



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

# **Efecto de la peletización de biomasa sobre el desempeño del proceso gasificación en un reactor de lecho fluidizado - Caso de estudio: cascarilla de arroz**

**Diego Fernando Vallejos Cifuentes**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Minas, Departamento de Procesos y Energía  
Medellín, Colombia

2018



# **Efecto de la peletización de biomasa sobre el desempeño del proceso gasificación en un reactor de lecho fluidizado - Caso de estudio: cascarilla de arroz**

**Diego Fernando Vallejos Cifuentes**

Tesis o trabajo de grado presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

**Magister en Ingeniería - Ingeniería Química**

Director(a):

PhD, Farid Chejne Janna

Línea de Investigación:

Procesos Termoquímicos

Grupo de Investigación:

Termodinámica Aplicada y Energías Alternativas (TAYEA)

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Procesos y Energía

Medellín, Colombia

2018



# Agradecimientos

A mis padres, mis hermanos y mi novia por el soporte constante durante este trayecto vivido en esta experiencia.

Al profesor Farid Chejne por su paciencia, sus conocimientos y su apoyo que hicieron posible la culminación exitosa de este trabajo.

Al grupo de investigación Termodinámica Aplicada y Energías Alternativas, al laboratorio de Ciencias de la Energía y a COLCIENCIAS, en el marco del proyecto No. 1118-669-45636, por abrirme los espacios y brindarme los recursos para el desarrollo de este proyecto.

A mis amigos y otras personas que estuvieron siempre ayudandome y apoyandome en estos años.

Muchas gracias



## Resumen

En este trabajo se estudia los efectos de la peletización de cascarilla de arroz como pretratamiento para un proceso de gasificación en un reactor de lecho fluidizado a escala piloto. En primer lugar, se llevó a cabo un estudio de peletización para encontrar las mejores condiciones en cuanto a tamaño de partícula, cantidad de humedad y adición de glicerina, a las cuáles se pueden producir pélets con unos parámetros de calidad suficientes, teniendo en cuenta los estándares europeos que rigen actualmente. Seguido de esto se realizaron pruebas de gasificación en un reactor de lecho fluidizado a escala piloto con los pélets seleccionados según el estudio de peletización.

Con base en los resultados se pudo concluir que para el proceso de peletización, tamaños grandes de partícula benefician la calidad de los pélets en cuanto a densidad de bulto, durabilidad y contenido de humedad pero afectan características del proceso como el rendimiento de producción y consumo energético. En el caso específico de la humedad, esta característica impacta significativamente en el tamaño de partícula usado; entre tanto, la glicerina afecta la calidad del pélet, pero beneficia el rendimiento de producción y genera un menor consumo energético.

En cuanto al proceso de gasificación, el uso de los pélets, facilita llevar a cabo un proceso de gasificación en condiciones estables, evitando cambios bruscos de temperatura en el lecho y la aglomeración de partículas por fusión de cenizas. Además, la gasificación de pélets de biomasa produjo una mejor conversión de carbón, mayor eficiencia de gas frío y un gas con mayor concentración de  $H_2$ ,  $CO$  y  $CH_4$ .

**Palabras Clave:** Cascarilla de arroz, peletización, gasificación, fluidización.

## Abstract

This work studies the effect of the pelletization of rice husk process as a physical pretreatment of biomass fluidized bed gasification. First, a study of rice husk pelletization was necessary to find the best conditions on the raw biomass in particle size, moisture content and glycerol addition to produce high quality pellets according to European standards. Then, a gasification study was made in a pilot scale fluidized bed gasifier using the selected pellets.

The results showed that quality parameters of pellets as bulk density, durability and moisture content were improved using ticker particles sizes, however, process characteristics as yield of production and energy consumption were negatively affected by the use of ticker particle sizes. The effect of moisture content was not clear because is strongly linked to the particle size, and the addition of glycerol improved the yield of production and energy consumption but the quality of pellets was negatively affected.

The addition a pelletized biomass to the fluidized bed gasification made the process more stable, avoiding agglomeration of particles because of ash fusion and avoiding high temperature instability. Besides, the pellets gasification of biomass produced a better carbon conversion, higher cold gas efficiency and a higher concentration of  $H_2$ ,  $CO$  and  $CH_4$  on the produced gas.

**Keywords:** Rice husk, pelletization, fluidization, gasification



# Contenido

<b>Agradecimientos</b>	<b>v</b>
<b>Resumen</b>	<b>vii</b>
<b>Contenido</b>	<b>ix</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>xi</b>
<b>Lista de tablas</b>	<b>1</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>2</b>
1.1. Hipótesis . . . . .	4
1.2. Objetivos . . . . .	4
<b>2. Marco teórico y estado del arte</b>	<b>6</b>
2.1. Peletización de biomasa . . . . .	9
2.2. Gasificación de biomasa en lecho fluidizado . . . . .	24
<b>3. Metodología</b>	<b>37</b>
3.1. Preparación y caracterización de la biomasa . . . . .	37
3.2. Peletización de cascarilla de arroz . . . . .	42
3.3. Gasificación de cascarilla de arroz . . . . .	49
<b>4. Resultados y discusión</b>	<b>54</b>
4.1. Peletización de cascarilla de arroz . . . . .	54
4.2. Gasificación de cascarilla de arroz . . . . .	69

---

<b>5. Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>83</b>
5.1. Conclusiones . . . . .	83
5.2. Recomendaciones . . . . .	85
<b>A. Anexo: Peletización</b>	<b>87</b>

# Lista de Figuras

2-1.	a) Composición estructural de la biomasa. b) Caracterización mediante análisis último y próximo. Tomado de [9] . . . . .	7
2-2.	Clasificación de biomasa dependiendo de su proveniencia. Elaboración propia basada en [10] . . . . .	8
2-3.	Proceso de peletización. Elaboración propia basado en [19] . . . . .	11
2-4.	Tecnologías de gasificación. Modificada a partir de [59] . . . . .	26
2-5.	Regímenes de fluidización. Tomada de [63] . . . . .	27
2-6.	Clasificación Geldart de partículas. Tomada de [64] . . . . .	29
2-7.	Determinación de la velocidad mínima de fluidización a través de la gráfica $\Delta P$ vs $u$ . Tomada de [64] y [65] . . . . .	31
3-1.	a) Cascarilla de arroz cruda. b) Malla de molino 2 mm. c) Molino usado para reducción de tamaño. . . . .	38
3-2.	Distribución de tamaño de partícula de la cascarilla de arroz . . . . .	39
3-3.	Equipo de peletización. a) Matriz, b) Rodillo, c) Montaje completo . . . . .	44
3-4.	Esquema del montaje para pruebas de gasificación . . . . .	51
3-5.	Esquema del montaje de fluidización . . . . .	53
4-1.	Imágenes de los pélets producidos para todas las mezclas . . . . .	55
4-2.	Resultados en el rendimiento de producción . . . . .	56
4-3.	Resultados para el consumo energético . . . . .	58
4-4.	Resultados para la distribución de longitud de los pélets . . . . .	60
4-5.	Resultados para la densidad de bulto . . . . .	61
4-6.	Resultados para la durabilidad . . . . .	63

4-7. Resultados para el contenido de humedad . . . . .	64
4-8. Pruebas de fluidización para diferentes tamaños de biomasa. a) 0.6 mm, b) 0.73 mm, c) 0.93 mm, d) 1.6 mm . . . . .	71
4-9. Curvas de fluidización para los diferentes tamaños de partícula . . . . .	72
4-10. Fluidización de pélets de cascarilla de arroz en un lecho de arena sílice. a) 5 %, b) 10 %, c), 15 %, d) 20 % . . . . .	73
4-11. Curva de fluidización para 10 % en masa de pélets de cascarilla de arroz en un lecho de sílice . . . . .	74
4-12. Seguimiento de gases (a) y (b) y seguimiento de temperatura (b) y (d) para la gasificación de CA y de PCA respectivamente . . . . .	78
4-13. Resultados de pruebas de gasificación. a) Composición promedio del gas producto b) conversión de carbón y eficiencia de gas frío (CGE) . . . . .	79
4-14. Flujos de gas producto por masa de biomasa . . . . .	80
4-15. Aglomeración de partículas de biomasa desagregada . . . . .	82
4-16. Consumo de pélets de biomasa . . . . .	82

# Lista de Tablas

2-1. Normas para la evaluación de la calidad de pélets. Elaboración propia basado en [10], [21] . . . . .	23
2-2. Principales reacciones en el proceso de gasificación. Basado en [60] . . . . .	25
2-3. Clasificación Geldart de partículas. Basado en [64] . . . . .	29
2-4. Contenido de tar en el gas generado dependiendo de su aplicación . . . . .	33
3-1. Distribución granulométrica de la cascarilla de arroz . . . . .	38
3-2. Caracterización fisicoquímica de la cascarilla de arroz . . . . .	40
3-3. Caracterización de la glicerina . . . . .	42
3-4. Ficha técnica del equipo de peletización . . . . .	44
3-5. Mezclas para peletización preparadas . . . . .	44
3-6. Parámetros de ponderación para la selección de la mejor muestra . . . . .	48
3-7. Características de los materiales a fluidizar . . . . .	53
4-1. Resultados de Análisis Último, Próximo y poder calorífico para las mezclas peletizadas . . . . .	65
4-2. Tabla de ponderación para la selección de las mejores condiciones de peletización . . . . .	67
4-3. Materiales para pruebas de fluidización . . . . .	70
4-4. Velocidad mínima de fluidización para cada mezcla . . . . .	72
4-5. Condiciones del proceso para las pruebas de gasificación . . . . .	75
4-6. Propiedades fisicoquímicas de los materiales . . . . .	76
A-1. Comparación de los parámetros de cada muestra peletizada respecto a diferentes norma para calidad de pélets de biomasa . . . . .	88

# 1. Introducción

El cambio climático y la necesidad energética mundial han adentrado al hombre en una búsqueda incesante de fuentes energéticas alternativas a los combustibles fósiles y al desarrollo de tecnologías para la implementación de las mismas. En este ámbito, las investigaciones mundiales sobre el tema se enfocan en el desarrollo de tecnologías para la obtención de energía a partir de fuentes renovables, como lo son: la energía eólica, hidráulica, geotérmica, solar y energía obtenida a partir de biocombustibles.

Los biocombustibles tienen como fuente primaria principal lo que se conoce como biomasa y estos pueden estar en estado sólido, líquido o gaseoso [1]. La biomasa es un término usado para describir todo el material orgánico proveniente de las plantas y que es generado mediante proceso fotosintético. De esta manera, la biomasa en última instancia almacena energía solar mediante enlaces adyacentes entre las moléculas de carbono (C), hidrógeno (H) y oxígeno (O) que cuando se rompen liberan energía o generan los productos derivados o biocombustibles [2].

En el sector agrario se diferencian dos tipos de biomasa, las procedentes de desechos agroindustriales y las procedentes de cultivos energéticos. Los primeros se refieren a los residuos vegetales tras la vida útil del cultivo vegetal (obtención del fruto), y los segundos a la consecuencia del cultivo industrial sin otro uso más, que el de obtener energía con o sin transformación del producto vegetal. Estas biomasa con o sin transformación físico-química se podrían considerar como “biocombustibles” si se destinan a un uso energético; de entre estos se destacan las leñas, el carbón vegetal, pélets y briquetas de biomasa, bioetanol y gas de síntesis obtenido por gasificación [3].

Colombia, al ser un país de gran potencial agroindustrial genera una gran cantidad de residuos para su aprovechamiento energético. Existen muchas actividades agrícolas en Colombia, entre las cuales está la producción de arroz, que es la tercera actividad agrícola después de la caña de azúcar y el plátano. Dentro de su cadena productiva, el principal desecho generado es la cáscara que recubre el grano arroz, a la que se conoce comúnmente como cascarilla de arroz. De éste desecho se generan aproximadamente 400000 toneladas año [4], que no tiene un uso específico por su alta cantidad de  $SiO_2$  y que además causa un problema por su disposición final para las empresas productoras de arroz. Los usos posibles para la cascarilla de arroz son: en el sector energético como combustible; agrícola como compost o abono para la tierra; en el sector de la construcción como aislante térmico y sonoro. En Colombia principalmente la cascarilla de arroz presenta un uso agrícola, por lo que abre la posibilidad de usar este desecho como materia prima para la producción de energía mediante los diferentes procesos biológicos o termoquímicos [5].

Para el uso de la cascarilla de arroz como fuente de energía, se tienen diferentes rutas de conversión que generan productos de valor agregado. Existen principalmente dos rutas de conversión principales: la conversión mediante procesos bioquímicos y la conversión mediante procesos termoquímicos. Entre los procesos termoquímicos está la gasificación que convierte un combustible carbonoso (como la biomasa) en un combustible gaseoso que facilita su uso, transporte y almacenamiento. Este gas resultante puede ser usado para la generación de energía térmica por medio de combustión directa; puede ser transformado en combustibles líquidos o puede entrar en un ciclo combinado para la generación de energía eléctrica [6].

Si bien la cascarilla de arroz presenta un potencial energético grande en Colombia, aún hay barreras que se deben superar para su uso comercial como fuente de energía y más concretamente para ser usada en procesos de gasificación. Una de estas barreras está ligada a las características de la biomasa, como son, su baja densidad de bulto, su forma y tamaño irregular que generan problemas para su transporte, almacenamiento y en su

tratamiento en general. Sin embargo, existen diferentes tipos de pretratamientos que ayudan a mitigar este problema. Uno de estos procesos es la peletización, que no es más que la densificación del material para obtención de partículas de una geometría esférica o cilíndrica con el objetivo de lograr una biomasa más resistente a la degradación física y biológica, con características más homogéneas y con una densidad mayor [7].

## **1.1. Hipótesis**

El desempeño del proceso de gasificación se favorece por la adición de biomasa peletizada, debido a que se introducen al proceso partículas de una mayor densidad energética y geometría uniforme. Lo anterior causa que se presente una dinámica de reacción diferente en el combustible, menor elutriación de las partículas y por tanto mayor tiempo de residencia de las mismas haciendo que el rendimiento global del proceso se vea mejorado.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo General**

Evaluar el desempeño de la gasificación de pélets y compuestos desagregados de la cascarilla de arroz mediante la tecnología de lecho fluidizado.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Determinar las diferencias entre las propiedades físicas y químicas de la biomasa desagregada y peletizada.
- Comparar las condiciones fluidodinámicas de la cascarilla de arroz en forma desagregada y peletizada.
- Evaluar el desempeño de la cascarilla de arroz de forma desagregada y peletizada bajo el proceso de gasificación en lecho fluidizado.



Para cumplir con los objetivos y probar la hipótesis, se llevó a cabo un trabajo que se plasma en este documento como se describe a continuación.

En el segundo capítulo se realiza el marco teórico y una revisión del estado del arte de los procesos de peletización y gasificación de biomasa. La primera parte corresponde al proceso de peletización, en la que se describen cómo se dan los diferentes mecanismos de aglomeración y qué variables los afectan durante el proceso. Además, se describe cómo se evalúa la calidad de los pélets según la comunidad internacional y se realiza una revisión de los diferentes trabajos realizados tanto para cascarilla de arroz, como para otras biomásas de este tipo. Por otro lado, se describe con detalle el proceso de gasificación de biomasa en un reactor de lecho fluidizado, teniendo en cuenta la fluidización de la biomasa para una correcta operación del equipo. También se realiza una revisión del estado del arte para la gasificación y fluidización de biomásas peletizadas. En el tercer capítulo se describe la metodología usada para cumplir con satisfacción los objetivos planteados. Se describe el proceso de caracterización y preparación de la biomasa; se menciona cómo se realizó el estudio de peletización, qué variables se tuvieron en cuenta, y cómo y a partir de qué parámetros se hizo la evaluación de la calidad de los pélets; se describen los equipos usados para los estudios de peletización y gasificación, y se muestra con detalle los protocolos usados para la realización de las pruebas de gasificación.

En el cuarto capítulo se pueden encontrar los resultados obtenidos de todos los experimentos planeados. Se analizan todos los efectos de los parámetros evaluados para el proceso de peletización y hace la selección de las mejores condiciones para evaluarlos en el proceso de gasificación. Adicionalmente, se encuentran los resultados obtenidos para todas las pruebas de gasificación y se analiza el efecto de la peletización sobre el proceso.

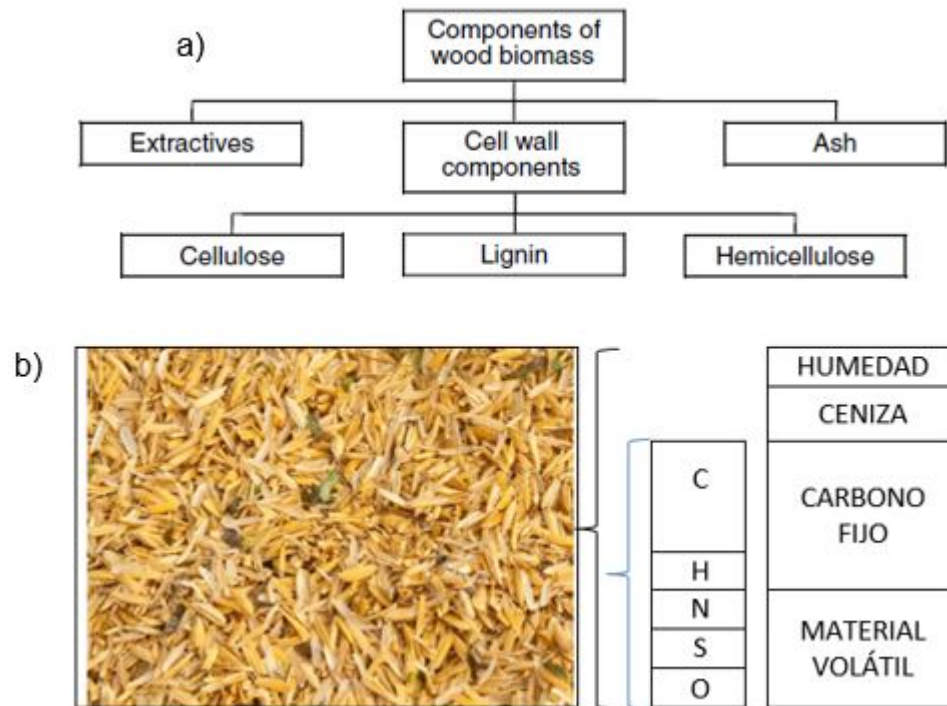
Finalmente, en el quinto capítulo se concluye respecto a los resultados obtenidos para el proceso de peletización y gasificación y se hacen algunas recomendaciones para estudios futuros.

## 2. Marco teórico y estado del arte

La biomasa es el combustible con mayor antigüedad en la historia de la humanidad y ha sido usada como fuente de energía para calentamiento y para la cocción de alimentos. Se tienen varias definiciones para la biomasa, Siedlecki et al [8] considera que la biomasa se puede describir como “Material vegetal y desechos de animales que pueden ser usados como combustibles”; por otro lado, Basu [9] la define como cualquier material orgánico derivado de plantas o animales que puede ser usado como fuente de energía. Si bien la biomasa dejó de ser utilizada a gran escala como fuente de energía a nivel mundial debido a la introducción del carbón y los combustibles fósiles, ésta ha tomado un nuevo rumbo en su implementación como materia prima en nuevos procesos industriales. Esto se debe a que la biomasa se encuentra disponible prácticamente en todos los lugares del mundo y su desarrollo toma un corto tiempo (a diferencia de los combustibles fósiles) lo que hace que su disponibilidad sea casi infinita, convirtiéndola en una fuente de energía renovable.

La estructura molecular de la biomasa está compuesta principalmente por celulosa, hemicelulosa, lignina, extractivos, lípidos, proteínas, azúcares simples, almidón, agua, material inorgánico (ceniza); todos estos componentes dan a la biomasa la característica de combustible, debido a que en ellos se encuentran largas cadenas carbonosas que a ciertas condiciones se pueden romper, liberando energía. Además, esta composición depende de variables como: tipo de biomasa, lugar de cultivo, condiciones del cultivo, condiciones del proceso previo en caso de desechos agroindustriales, etc. Con todo lo dicho anteriormente, la biomasa se puede caracterizar como un combustible sólido (Figura 2-1), al igual que el carbón mineral, mediante los análisis próximo y último, que consisten en la determinación de % Material volátil, % Carbono fijo, % Cenizas, % Humedad, % Azufre, poder

calorífico y %C, %H, %N, %O, %S, respectivamente.



**Figura 2-1.:** a) Composición estructural de la biomasa. b) Caracterización mediante análisis último y próximo. Tomado de [9]

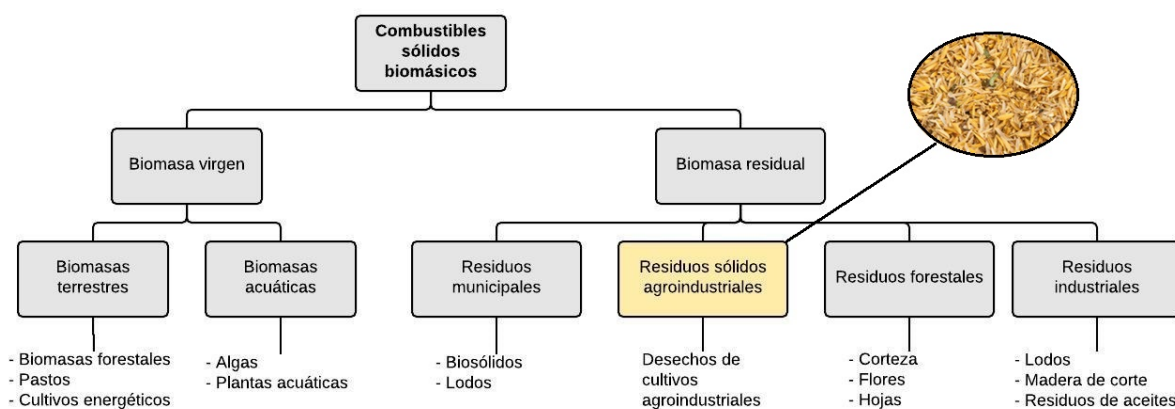
En cuanto a su clasificación, la biomasa se puede clasificar en diferentes categorías que dependen de su procedencia. Según las normas europeas que rigen este aspecto (DIN EN 14961), las biomásas se clasifican en tres ramas principales que a su vez se subdividen en diferentes tipos de biomásas. Las tres ramas principales son: las biomásas madereras, las biomásas de tipo tallo y biomásas provenientes de las frutas. La clasificación se puede ver con más detalle en la Figura 2-2.

La baja densidad y la forma irregular de la biomasa hacen que su transporte, almacenamiento y su tratamiento en general sea complicado, a diferencia de otros combustibles líquidos o gaseosos. Debido a esto, existe una motivación para usar la biomasa como materia prima en diferentes procesos de conversión que la transforman en un combustible

de fácil manejo.

Existen dos tipos principales de procesos de conversión de la biomasa:

- **Conversión bioquímica:** En la conversión bioquímica, moléculas de la biomasa se parten en moléculas más pequeñas con ayuda de bacterias y enzimas. Este proceso es lento y no requiere de cantidades grandes de energía. Las principales rutas son digestión, fermentación e hidrólisis ácida y los principales productos de éstas son metano y etanol.
- **Conversión termoquímica:** En la conversión termoquímica toda la biomasa es convertida en gases o líquidos que son usados como precursores de productos más elaborados (obtención de combustibles líquidos mediante procesos Fischer-Tropsch) o simplemente usados de manera directa (combustión de gas de síntesis). Los principales procesos termoquímicos son la combustión, pirolisis, gasificación.



**Figura 2-2.:** Clasificación de biomasa dependiendo de su proveniencia. Elaboración propia basada en [10]

Existe un gran interés por la gasificación de la cascarilla de arroz a nivel mundial. Solo en los dos últimos años, se tienen 6 estudios directamente relacionados con la gasificación de cascarilla de arroz en diferentes tecnologías, a diferentes parámetros de operación y

diferentes condiciones de material (tamaño de partícula, contenido de humedad) [11-16].

Si bien existen estudios sobre estos dos tipos de conversión principales, se encuentra que la conversión bioquímica está más desarrollada, incluso a nivel industrial. Sin embargo, el área de estudio de la termoquímica presenta un gran futuro como solución a los problemas energéticos y ambientales por las cuáles atraviesa el mundo en la actualidad. En especial, la gasificación ha tenido especial atención debido a que el producto generado en el proceso (gas de síntesis) es fácil de manejar e implementar a las diferentes cadenas de producción de combustibles como por ejemplo los procesos Fischer-Tropsch, combustión directa y generación de energía eléctrica mediante ciclos combinados.

## **2.1. Peletización de biomasa**

Características de la biomasa como, la baja densidad de bulto, forma irregular y baja resistencia mecánica generan problemas en diferentes procesos en los que se utiliza como materia prima. La aplicación de pre tratamientos sobre el material puede dar solución a algunos de estos problemas. Estos tratamientos pueden ser de tipo bioquímico, mecánico y termoquímico [17]. Entre todos estos, la peletización, un proceso de tipo mecánico, se torna una solución viable para mejorar las propiedades de este tipo de materiales, debido a que su baja densidad de bulto hace que los costos de operación para su transporte y almacenamiento sean altos [18].

Según Obernberger los pélets de biomasa se definen como “un biocombustible sólido con una calidad consistente – bajo contenido de humedad, alta densidad energética y tamaño y forma homogéneos” [7]. Por lo tanto, la peletización de biomasa se define como el proceso de densificación de material biomásico para la producción de pélets.

La peletización se clasifica como un método de aglomeración de partículas por medio de presión mecánica. En los equipos de peletización el material alimentado es presionado por medio de rodillos a través de agujeros dentro de un disco metálico conocido como

matriz; la fricción generada entre el material alimentado y las paredes de la matriz, impiden el flujo libre de las partículas que a su vez se van aglomerando por la presión ejercida por los rodillos, formando los pélets. A la salida de la matriz existen unas cuchillas que cortan los pélets en un tamaño deseado para su posterior almacenamiento y distribución.

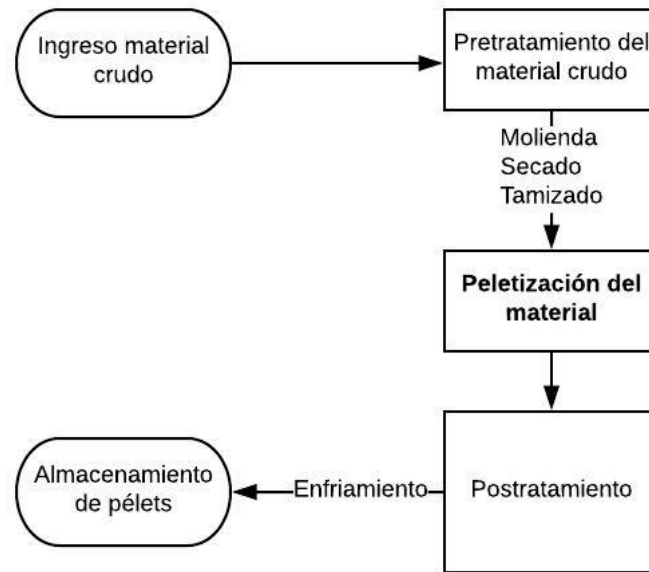
El interés principal de este trabajo es encontrar los mejores pélets producidos comparados con los diferentes estándares que rigen actualmente en varios países del mundo. De esta manera, este trabajo se enfoca en analizar con más detalle el proceso de aglomeración de las partículas, de qué va a depender y qué factores afectan directamente la calidad de los pélets producidos.

### **2.1.1. Proceso de peletización**

El proceso de peletización a nivel industrial se puede dividir en tres etapas principales, que son: pre tratamiento de la biomasa cruda, peletización y pos tratamiento de los pélets producidos (ver Figura 2-3) [19].

En el pre tratamiento, la biomasa se somete a diferentes procesos con el objetivo de tener una materia prima homogénea para una óptima producción de los pélets. La reducción de tamaño y la remoción de humedad son los principales procesos en este aspecto, debido a que afectan de forma directa el proceso y por lo tanto la calidad de los pélets. Sin embargo, existen nuevos procesos de pre tratamiento para mejorar la calidad de la peletización como la torrefacción y la explosión de vapor [20].

En la peletización, la parte más importante del proceso, las partículas de biomasa se aglomeran debido a la presión ejercida por rodillos que obliga a la biomasa a pasar a través de agujeros contenidos dentro de la matriz. En este proceso son importantes las condiciones a las que entra la biomasa, el tipo de biomasa que se alimenta y el tipo de peletizadora usado.



**Figura 2-3.:** Proceso de peletización. Elaboración propia basado en [19]

El pos tratamiento de los pélets producidos depende del uso que se le va a dar a dichos pélets. Entre algunos de ellos puede estar la torrefacción, el secado y la humectación con aditivos.

### 2.1.2. Propiedades de los pélets de biomasa

Como un combustible sólido, al igual que el carbón, los pélets deben cumplir con una serie de normas en cuanto a sus características físicas y químicas correspondientes. Estas normas se basan principalmente en que el uso final de los pélets será para obtención de energía a partir de su combustión directa, por lo tanto tienen en cuenta niveles de emisiones generadas, y su uso en general en equipos de combustión [21]. A continuación se describen estas características que se tendrán en cuenta al momento de evaluar la calidad de un pélet basado en lo descrito por García-Maraver A y I. Orbernberger y G. Thek [7], [22], [23], [24].

- **Durabilidad:** La durabilidad o resistencia a la abrasión es un parámetro que mi-

de la habilidad de un pélet de permanecer intacto después de una actividad de transporte o almacenamiento. Cuando se da el transporte de pélets, estos tienden a desintegrarse en partículas pequeñas debido a la fricción que se da entre los mismos y en contacto con otras superficies. Este comportamiento no es ideal para el uso en combustión debido a que estos “finos” generan mayores emisiones en material particulado, pueden causar explosiones y generan problemas en equipos de alimentación.

- **Densidad de bulto:** La densidad de bulto se refiere al espacio que ocupa una masa determinada de pélets de biomasa, teniendo en cuenta los espacios libres entre partículas. De esta manera, cuando se tienen partículas pequeñas que se puedan acomodar de manera correcta haciendo que los espacios libres sean más pequeños, la densidad de bulto será mayor. El proceso de peletización influye mucho sobre este parámetro, haciendo que la densidad de bulto de la biomasa aumente entre 4 y 8 veces su densidad normal.
- **Densidad de partícula:** Es la relación entre la masa de un pélet y el volumen ocupado por el mismo, teniendo en cuenta la porosidad. Este parámetro influye mucho sobre la densidad de bulto y otras propiedades físicas de la biomasa como conductividad térmica y tiempo de combustión.
- **Contenido de humedad:** Este parámetro es importante para el almacenamiento de los pélets producidos, debido a que existe la posibilidad de crecimiento bacteriano a altos niveles de humedad, que causan degradación química y física de los pélets. En general el contenido de humedad debe ser menor al 20 % para evitar este problema [25].
- **Tamaño de los pélets:** El tamaño de los pélets es muy importante debido al manejo que se les va a dar en su uso final. Esto se refiere principalmente a los sistemas de alimentación y transporte (en especial neumático), los cuáles se pueden dificultar con tamaños muy grandes. Debido a esto, los pélets deben cumplir una relación entre su longitud y diámetro. Además, materiales densificados con tamaños muy



grandes (mayores a 15 mm) se conocen como briquetas.

- **Poder calorífico:** El poder calorífico es un factor fundamental para el uso energético de la biomasa. Este nos habla de la cantidad de energía que se puede obtener por unidad de masa de pélets. Sin embargo, debido a que la peletización es un proceso netamente físico, el poder calorífico será el mismo de la biomasa a menos que se agreguen otro tipo de aditivos, así que este parámetro está sujeto a las características de la biomasa cruda.
- **Contenido de ceniza:** Es importante conocer el contenido de ceniza para un proceso energético debido a que es un inerte dentro del mismo. Al igual que el poder calorífico este depende netamente de las características de la biomasa cruda.
- **Contenido de nitrógeno, cloro y azufre:** Para el uso energético de los pélets el contenido de N, Cl y S es importante por las emisiones de NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, y formación de HCl que se pueden dar en el proceso.

### 2.1.3. Proceso de aglomeración de partículas

El proceso de aglomeración de partículas de biomasa es complejo, y de él depende la calidad del pélet resultante en cuanto a sus propiedades mecánicas se refiere. A continuación se describen 5 tipos de mecanismos de aglomeración, según lo descrito en la literatura [26]–[30]:

- **Puentes sólidos:** Los puentes sólidos son fuerzas químicas que se forman debido al cambio de estado o a reacciones químicas de las diferentes sustancias que componen la biomasa; estas son las fuerzas que finalmente definen la dureza y la calidad del pélet obtenido. Todos estos puentes sólidos pueden formarse debido a la aplicación de altas presiones y temperaturas, que impulsan procesos como la sinterización, reacciones químicas, solidificación de componentes derretidos, endurecimiento de aglomerantes y cristalización de materiales disueltos. N. Kaliyan y R. Morey [30] encontraron que para residuos del maíz y pasto, los principales componentes que

forman puentes sólidos en los pélets producidos son, los carbohidratos solubles en agua, lignina, proteína, almidón y grasas.

- **Fuerzas de atracción entre partículas sólidas:** Son fuerzas de tipo molecular y de corto alcance, lo que hace que dependan de su tamaño de partícula y de la cercanía entre partículas. Entre estas se pueden encontrar fuerzas de van de Waals y cargas electrostáticas o magnéticas. No tienen gran relevancia en la dureza y calidad final de los pélets, sin embargo, sirven como medio para que otro tipo de fuerzas de mayor magnitud (como los puentes sólidos) entren en juego.
- **Enclavamiento mecánico:** Se da por el emparejamiento de partículas con forma plana, irregular y fibrosa que se entrelazan entre sí. Este tipo de fuerzas no influyen en la dureza y calidad del pélet, sin embargo son importantes para mantener la compactación del material después del proceso [31].
- **Fuerzas de adhesión y cohesión:** Se dan principalmente por sustancias viscosas que se adhieren a la superficie de las partículas formando, capas muy finas de éstas sobre la superficie; de esta manera, forman fuerzas entre partículas que son similares a los puentes sólidos. Además, debido a la adherencia de estos líquidos a las partículas, la superficie de la misma se ve suavizada permitiendo un aumento en la interacción entre partículas sólidas haciendo que éstas últimas tengan una mayor participación en el proceso de aglomeración.
- **Fuerzas capilares e interfaciales:** Se dan debido a la presencia de sustancias en estado líquido durante el proceso de aglomeración. Este líquido llena espacios libres presentes entre las partículas al momento de aplicar presión sobre ellas; de esta manera actúa con una fuerza de presión, incrementando la fuerza de unión entre partículas sólidas y manteniéndolas unidas debido a la tensión superficial.

#### 2.1.4. Factores que afectan el proceso de peletización

Los factores que afectan el proceso de peletización se pueden dividir en dos grupos principales: las características químicas de la biomasa y las variables que intervienen dentro

del proceso de peletización. Todo lo anterior influye en las características físicas y mecánicas de los pélets obtenidos, que con una combinación adecuada de todas estas variables serán pélets con una calidad que cumpla con los estándares ya establecidos.

### Propiedades de la biomasa

La biomasa presenta una diferencia muy notable en su composición química que puede variar de especie a especie, y entre las mismas especies, dependiendo de su forma y lugar de cultivo. Como se mencionó anteriormente esta composición está relacionada con el porcentaje de hemicelulosa, lignina, celulosa, proteínas, almidones, grasas y extractivos en general. La cantidad de todos estos componentes son importantes dentro del proceso de peletización y afectan la calidad del producto final.

- **Ligninocelulosa:** Sustancias que componen la biomasa como la lignina, celulosa y hemicelulosa, pueden actuar como aglomerantes propios de la biomasa [24]. De estos tres la más importante es la lignina, que a elevadas temperaturas se funde y genera un material blando y no cristalino que se distribuye a lo largo del material comprimido, formando puentes sólidos. A este punto se le conoce como transición vítrea de la lignina y la temperatura asociada a este punto va a ser clave para la formación de los pélets. Existen varios estudios en donde resaltan la importancia de la lignina en la peletización; J. Castellano et al [32] analizaron la importancia de la composición de la biomasa en la calidad de pélets realizados con diferentes biomasa. En este estudio encuentran que la lignina es fundamental en la calidad de los pélets; biomasa con cantidades mayores de lignina obtuvieron mejor durabilidad y mejor densidad de bulto. Por otro lado W. Stelte et al [33] y P Gilbert et al [34] estudiaron las temperaturas de transición vítrea de la lignina para biomasa como la paja de trigo y pasto varilla, encontrando intervalos de entre 55-60 °C y 80-100 °C respectivamente. Se observa que además esto afecta directamente en propiedades de los pélets como la densidad de bulto y la durabilidad.
- **Grasas:** Su concentración tiene un efecto negativo en la producción de pélets. Las grasas actúan como un lubricante que disminuye la fricción entre el material alimen-

tado y la matriz, lo que genera una pérdida de presión y por lo tanto un producto con menor calidad [24]. Por otro lado, W. Stelte et al [35] menciona que las grasas pueden formar una capa cerosa débil que disminuye el contacto entre las partículas y por lo tanto la formación de enlaces fuertes para la aglomeración.

- **Almidón:** El almidón se encuentra en grandes cantidades en las plantas. Su forma principal son gránulos, que sometidos a altas temperaturas pueden presentar diferentes reacciones como: la gelatinización, empastado y retrodegradación. De todas las anteriores, la que más influencia tiene en la peletización es la gelatinización, en la cual la amilasa del almidón forma enlaces de doble hélice que pueden unirse entre ellos mediante puentes de Hidrógeno [24]. Said et al [36] estudiaron la adición de almidón para la producción de pélets con paja de arroz y encontraron que el almidón ayuda a generar pélets con mayor durabilidad y densidad de bulto.
- **Proteína:** La proteína actúa como otro agente aglomerante propio de la biomasa. Al someterse a altas temperaturas, la proteína entra a un estado de desnaturalización, generando la formación de enlaces con otras estructuras dentro de la biomasa como los lípidos y el almidón [24]. Un estudio realizado por Sokhansanj et al [37] muestra que biomasa con mayor cantidad de proteína generan pélets con una mayor densidad y durabilidad.
- **Contenido de agua:** la cantidad de humedad del material de entrada juega un papel importante en el proceso. El agua dentro de la biomasa ayuda en el proceso de gelatinización del almidón, en la disminución de la temperatura de transición vítrea de la lignina y en la desnaturalización de la proteína [24]. Adicional a esto, la humedad puede actuar como un tipo de aglomerante débil, ya que crea una capa que ayuda a mejorar el área de contacto entre partículas [38]. Debido a la importancia que tiene éste parámetro dentro del proceso, es vital determinar un rango de humedad para el cual la producción de pélets es posible. Además, se necesita que los pélets cumplan con una calidad mínima, según los estándares establecidos.

Existen varios estudios que determinan este rango de humedad. Ishii y Furuichi [39] estudiaron los efectos de varios parámetros del proceso, incluyendo la humedad ini-

cial de la biomasa, sobre propiedades como la densidad de bulto, la durabilidad y el rendimiento de producción. Encontraron que el rango de humedad para pélets con durabilidad y rendimiento aceptables es de 13 %-20 %. Por otro lado, Jackson et al [40] investigaron la influencia de la humedad de la biomasa con respecto a la durabilidad de los pélets producidos para 5 tipos de biomasa diferentes. Encontraron que las humedades entre 20 % y 25 % son las ideales para generar pélets con buena durabilidad; en cuanto a las humedades bajas, se obtiene durabilidades bajas e incluso no se tiene producción de pélets. Puig - Arnavat et al [41], estudiaron las propiedades de los pélets producidos con 6 biomosas diferentes en una peletizadora de una sola unidad. Encontraron que la humedad ideal es del 10 % y que los resultados de la peletizadora de una sola unidad se pueden extrapolar a otras tecnologías a escala industrial. Finalmente, una cantidad grande de agua puede resultar en un efecto negativo en la calidad de los pélets, debido a que el agua actúa como lubricante y disminuye el factor de fricción entre la matriz y el material.

A parte de todas las características mencionadas anteriormente, también influyen todas las propiedades térmicas de la biomasa como la ceniza, el poder calorífico, cantidad de volátiles, etc. Sin embargo, estas no se mencionan ya que son parte de la biomasa y no cambian en un proceso físico como la peletización; de esta manera, si bien se tienen en cuenta para analizar la calidad de los pélets, estas no tienen un efecto directo dentro del proceso.

En cuanto a lo estudiado para la cascarilla de arroz, Yang et al [42] estudiaron la peletización de cascarilla de arroz y paja de arroz en una peletizadora de una sola unidad, variando la temperatura de la matriz y el tiempo de residencia de los pélets. Encontraron que la mejor durabilidad de los pélets se presentaba para temperaturas elevadas (150 °C) y a tiempos de peletización de 3 min. Adicionalmente, evaluaron la viabilidad de la biomasa peletizada para su uso en hornos, y concluyeron que se debe someterla a algunos pretratamientos para disminución de su porcentaje de ceniza.

Por otro lado, Xu et al [43], encontraron la mezcla ideal de componentes para la produc-

ción de pélets de cascarilla de arroz cumpliendo con los estándares europeos establecidos. Los resultados obtenidos fueron 15 % de humedad, 5 % de glicerol y 8 % de antracita.

Missagia et al [44], estudiaron las propiedades de pélets producidos con cascarilla de arroz variando el tamaño de partícula (2, 4 y 6 mm) y el contenido de humedad (17 %, 19 %, 20 %). Concluyeron que con 17 % de humedad y con los tres tamaños de partícula los pélets cumplían los estándares europeos.

Bakari y Ngadi [45] estudiaron cómo afecta el tipo de aglomerante añadido sobre la densidad y la resistencia a la humedad (permeabilidad) de briquetas producidas con cascarilla de arroz como material crudo, a una humedad del 15 %. Se estudiaron 3 aglomerantes: cera parafina, afzelia africana, goma arábica. Se encontró que el mejor pélet, en cuanto a densidad y permeabilidad, se produjo con la afzelia africana. El resultado se puede explicar por el bajo contenido de grasas de la afzelia africana.

Yank et al [46] investigaron la briquetización de cascarilla de arroz. Se evaluó el efecto de los parámetros de entrada: tipo de aglomerante, cantidad de aglomerante y contenido de agua, sobre propiedades de las briquetas: densidad, poder calorífico, durabilidad y dureza. Los resultados muestran que las briquetas con mejor durabilidad y dureza, son las realizadas con polvo de arroz, mientras que los pélets con mejor densidad son los producidos con almidón. En general se determinó que la adición de agua en la producción de las briquetas aumentaba la calidad del pélet, teniendo como humedad ideal el 15 %.

### **Variables físicas que intervienen en el proceso**

La calidad final del pélet depende, además de la composición de la biomasa, de las características físicas del proceso como, la temperatura, la presión, las dimensiones de la matriz, etc. Cada una de estas características y estudios anteriores sobre ellas, se describe a continuación:

- **Tamaño de partícula:** En general, el tamaño de partícula de la biomasa cruda influye sobre la densidad y la durabilidad de los pélets producidos. Para tamaños

más pequeños tanto la durabilidad como la densidad aumentan de forma considerable. Sin embargo, esta condición no es muy favorable debido a los altos costos en molienda que puede presentar llevar el material a tamaños pequeños [24], [47]. De esta manera es importante encontrar hasta qué tamaño de partícula la peletización es económicamente viable. S. Mani et al [48] afirman que a medida que el tamaño disminuye, la calidad de los pélets, en cuanto a su densidad, sube de manera considerable. Esto se debe a que existe una mayor fuerza de atracción entre partículas sólidas debido a una mayor área de contacto. Por otro lado, el tamaño de partícula tiene un efecto considerable en la durabilidad de los pélets; en general, entre más pequeño el tamaño de partícula mayor, la durabilidad de los pélets; esto se explica por la capacidad de retención de humedad de las partículas más pequeñas.

Por otro lado, Ishii y Furuichi [39] encontraron que para los tamaños de 5 mm, 10 mm y 20 mm de paja de arroz, la durabilidad y la densidad aumentaban conforme aumentaba el tamaño de partícula, sin embargo el efecto no es tan notorio. La explicación de esto se da por la forma fibrosa de la biomasa.

Castellano et al. [32] estudiaron el efecto de varias variables del proceso (entre ellas el tamaño de partícula), sobre la calidad de pélets producidos para 12 biomásas. En la mayoría de los casos (no todos) se obtuvo que la durabilidad se veía beneficiada para tamaños de partícula menores. Además de esto se analizó la potencia usada para la producción de los pélets para los diferentes tamaños de partícula. El resultado fue que para tamaños más grandes se necesita una potencia mayor para la generación de los pélets. Todo lo anteriormente mencionado, aumenta el interés de estudiar el efecto del tamaño de partícula sobre las diferentes características de los pélets.

- **Temperatura:** La temperatura es uno de los factores más importantes en el proceso de peletización debido a que actúa de diferentes maneras en la compactación del material. Varios autores [24],[32],[36],[39],[49],[50] describen el efecto de la tempe-

ratura sobre la durabilidad y densidad de los pélets de biomasa. Para las biomásas de tipo lignocelulósico, altas temperaturas suavizan la lignina haciendo que entre en un estado plástico, que permite una mejor deformación de las partículas y por lo tanto un mayor contacto sólido-sólido. Además, dado que la lignina tiene un punto de fusión bajo (aproximadamente 150 °C), esta puede formar puentes sólidos que juegan un papel importante en la aglomeración de partículas.

La temperatura también ayuda a la desnaturalización de la proteína y el almidón, que a condiciones de humedad requeridas pueden formar fuerzas de tipo sólido. Adicionalmente, la liberación de humedad de la biomasa debido a altas temperaturas ayuda al aumento del coeficiente de fricción entre biomasa y matriz. En general se describe que una temperatura entre 60°C y 100°C es óptima para la producción de pélets de biomasa con buena calidad.

- **Aglomerante externo adicionado:** En muchas ocasiones la biomasa a peletizar no presenta una cantidad suficiente de agentes aglomerantes internos, o no son lo suficiente mente altos como para la producción de pélets. Por lo tanto, se ve la necesidad de agregar un agente aglomerante externo que sea compatible con la biomasa y con el uso final que se le va a dar. La cantidad de un aglomerante externo puede variar entre 0.5 %wt y el 5 %wt [49]. Agentes aglomerantes propios de la biomasa como almidón, lignina, celulosa, proteína se pueden agregar como un agente externo [24],[48]. Además, agentes externos como el lignosulfato y la bentonita pueden mejorar en gran magnitud la calidad de los pélets [24], [49]. Por otro lado, la adición de glicerina puede actuar como aglomerante, lubricante y como un potenciador del poder calorífico de la biomasa [51]. Muchos estudios realizados, evaluando cantidad y diferentes tipos de aglomerantes [34], [36], [45], [46], [51] muestran el interés que se tiene respecto a esta variable en específico.
- **Presión:** La aplicación de altas presiones combinadas con altas temperaturas genera la creación de puente sólidos por la difusión de componentes de una molécula a otra en puntos de contacto, que mejoran la densidad [24]. Si bien la presión es un



parámetro importante, no es el parámetro final que define el proceso de peletización. La presión presenta un efecto positivo en cuanto a la densidad de los pélets obtenidos, sin embargo, este efecto no es muy claro cuando se habla de la durabilidad [28]. Lo anterior se debe a que si bien la presión está dada por el equipo de peletización usado, también depende de los mismas variables del proceso. Stelte et al. [52] estudiaron los efectos de variables del proceso como humedad, temperatura, tamaño de partícula y longitud de agujeros de la matriz sobre la presión aplicada. Los resultados que encontraron fueron que la humedad para biomasa madereras afectaba negativamente la presión; la temperatura afectaba negativamente la presión debido al ablandamiento de grasas y otros extractivos que disminuían el factor de fricción; la longitud de los agujeros tenían un efecto positivo sobre la presión, sin embargo, se debe tener cuidado con esta variable ya que una longitud muy grande puede ocasionar atascamientos; para el tamaño de partícula a medida que éste disminuye la presión aumenta. Finalmente, Yaman et al. [53] estudiaron la briquetización de desechos de oliva, y mencionan que debe existir un valor óptimo de la presión aplicada para obtener pélets con una buena calidad. Esto se debe a que a presiones muy altas, el pélet puede presentar una expansión muy fuerte a la salida de la matriz, lo que puede causar la formación de grietas y por lo tanto una pérdida en la calidad de pélet.

- **Geometría de la matriz:** La geometría de la matriz habla en realidad sobre el tamaño de los agujeros contenidos en ella. En este punto, es importante la relación entre la longitud y el diámetro de los mismos, ya que va a ser determinante sobre la calidad de los pélets obtenidos, en cuánto a densidad y durabilidad [24]. Un aumento en la relación entre longitud-diámetro ( $l/d$ ) llevará a un aumento en la densidad y la durabilidad del pélet, por un aumento en la presión aplicada y una mayor fricción entre la matriz y los rodillos. Sin embargo, si este valor llega a ser muy grande puede causar problemas de estancamiento del material y posterior bloqueo de la matriz [52],[54]. Varios estudios [55]–[57] muestran que la relación ideal entre estos parámetros de la matriz estaría entre 5 y 8, sin embargo esto dependerá mucho del tipo de biomasa a peletizar.

### 2.1.5. Estándares para la calidad de pélet de biomasa

Debido al uso de pélets en diferentes procesos industriales, principalmente en la combustión, algunos países se han visto en la necesidad de realizar normas con el fin de estandarizar diferentes parámetros característicos en los pélets que son importantes para su uso final. Algunos países europeos, que son los que más avance tienen sobre el tema, han realizado su propia normativa para la calidad de pélets; entre estos están Austria (ÓNORM M 7315), Suecia (SS 187120), Alemania (DIN 51731) e Italia (CTI-R04/05) [58]. Sin embargo, después de un tiempo y debido a algunas problemáticas en países como Alemania, se llegó a la conclusión en la creación de normas europeas que certifiquen la producción de pélets de calidad y que contengan la mayoría de los parámetros ya establecidos en las normas previamente seleccionadas. Estas normas son las CEN/TS 14588:2004 realizadas por el Comité Europeo de Estándares (CEN/TC 335), que evalúan los parámetros de calidad de los pélets de biomasa en la norma EN 14961-1.

En la Tabla 2-1 se presentan los valores establecidos por las diferentes normas descritas anteriormente, y a continuación se da una breve descripción de cada una. Debido a que algunas normas no tienen especificaciones para algunos parámetros, estos se dejan en blanco. También cabe aclarar que en algunas normas la durabilidad se expresa como el porcentaje de finos después de la prueba pertinente.

- **ÓNORM M 7315:** Estas son las normas desarrolladas en Austria en las cuáles se establecen los requerimientos para la calidad del pélet y las pruebas específicas para la caracterización de los mismos. Estas normas están enfocadas a pélets desarrollados con biomasa maderera.
- **SS 187120:** Norma desarrollada en Suecia, que se usa para la evaluación de pélets obtenidos a partir de biomasa de residuos de la industria maderera.
- **DIN 51731:** Estas normas desarrolladas en Alemania presentan dos requerimientos en sus parámetros de calidad, uno para pélets que tienen como uso final la industria (DIN 51731) y otras para pélets con uso final en hogares (DIN EN 15270). Para este trabajo se tomarán en cuenta las desarrolladas para uso industrial.

**Tabla 2-1.:** Normas para la evaluación de la calidad de pélets. Elaboración propia basado en [10], [21]

Parámetro	Norma				
	ONÖRM M7135	DIN 51731	SS 187120	CTI-R04/05	Fpr EN 14961-6
<b>Diámetro [mm]</b>	(4-10)	(4-10)	<25	(6-8)	(6-10)
<b>Longitud [mm]</b>	<5D	<5D	<4D	-	(3,15-50)
<b>Densidad de bulto [kg/m<sup>3</sup>]</b>	-	-	>600	620-720	>600
<b>Durabilidad [%]</b>	<2,3	<2,3	<0,8	<1	>97,5
<b>Contenido de humedad [%]</b>	<10	<12	<10	<10	<12
<b>Contenido de ceniza [%]</b>	<0,5	<1,5	<0,7	<1,5	<5
<b>Poder calorífico [kcal/kg]</b>	>4302	3705 - 4661	>4039	>3870	>14,1 (MJ/kg)
<b>% N</b>	<0,3	<0,3	-	<0,3	<2
<b>% S</b>	<0,04	<0,08	<0,08	<0,5	<0,2
<b>% Cl</b>	<0,02	<0,03	<0,03	-	<0,3
<b>Aditivos [%]</b>	<2	-	-	-	-

- **CTI R04/05:** Son las normas italianas desarrolladas con tres especificaciones dependiendo de la biomasa usada para peletizar.

A.1. Biomosas de tipo madera y sus residuos correspondientes A.2. Biomosas de tipo madera no incluidas en A.1, biomosas de tipo herbáceo sin tratar y mezclas entre los dos grupos anteriores A.3. Biomosas no incluidas en A.2 Para evaluar los pélets de cascarilla de arroz según la clasificación establecida, se elige A.2.

- **EN 14961-1:** Normas desarrolladas por el Comité Europeo de Estándares, que presentan diferentes especificaciones de los parámetros para la calidad del pélet dependiendo de la biomasa cruda con la que se produzcan. Según la clasificación dada en la norma, se elige Fpr EN 14961-6 para la evaluación de los pélets producidos con cascarilla de arroz.

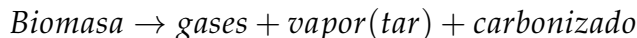
## 2.2. Gasificación de biomasa en lecho fluidizado

La gasificación es la conversión de materia prima líquida o sólida en gas combustible que puede ser quemado para la obtención de energía o puede ser usado para la producción de químicos de alto valor agregado [9]. En el proceso de gasificación, una fuente carbonosa es convertida en un gas combustible mediante una serie de reacciones que se llevan a cabo en un reactor (gasificador), a determinadas condiciones y en presencia de un gas o agente gasificante. Este agente gasificante puede ser vapor de agua ( $H_2O$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ) u oxígeno ( $O_2$ ), y usando cada uno de ellos se obtendrán diferentes composiciones del gas generado. Este gas se compone principalmente de monóxido de carbono ( $CO$ ), hidrógeno ( $H_2$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), vapor de agua ( $H_2O$ ), metano ( $CH_4$ ), nitrógeno ( $N_2$ ) y trazas de otros elementos, siendo el  $CO$  y el  $H_2$  los elementos más importantes debido a su característica de gas combustible y a su importancia en la producción de productos de valor agregado [59].

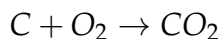
### 2.2.1. Química de la gasificación

El proceso de gasificación puede ser dividido en diferentes etapas, en los cuáles intervienen diferentes reacciones químicas, como se describe a continuación:

- **Evaporación de humedad o secado:** En este paso se retira toda la humedad que se encuentra en la biomasa para obtener un producto totalmente seco.
- **Pirólisis:** La fracción volátil de la biomasa se libera en gases condensables y deja un sólido conocido como carbonizado que está compuesto de carbono fijo y cenizas.



- **Oxidación:** Los gases producidos del paso anterior reaccionan con oxígeno ( $O_2$ ), produciendo la energía necesaria para otro tipo de reacciones.



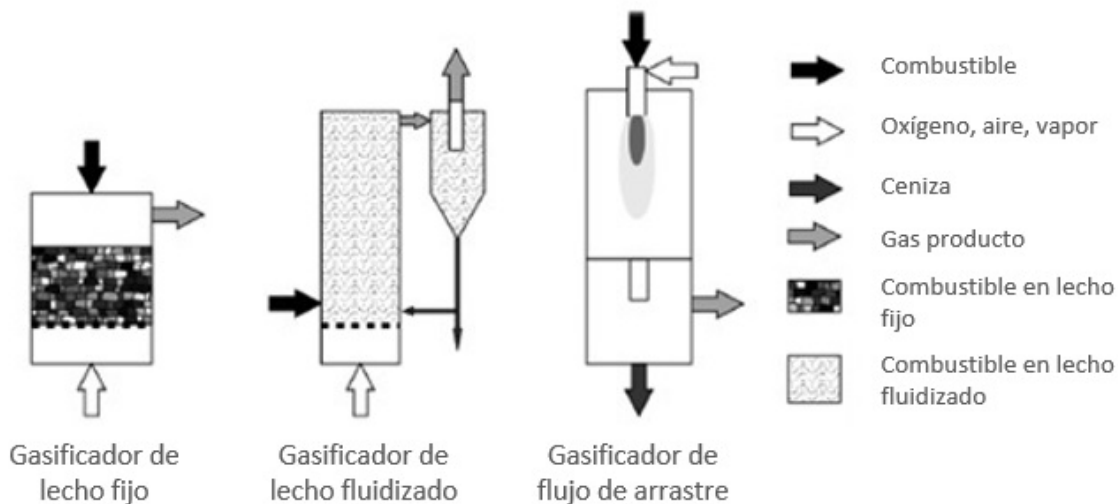
**Tabla 2-2.:** Principales reacciones en el proceso de gasificación. Basado en [60]

Nombre	Reacción
<b>Reacción Boudouard</b>	$C + CO_2 \leftrightarrow 2CO$
<b>Oxidación parical</b>	$C + 1/2O_2 \leftrightarrow CO$
<b>Oxidación completa</b>	$C + O_2 \leftrightarrow CO_2$
<b>Agua - gas por desplazamiento</b>	$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$
<b>Formación de metano</b>	$CO + 3H_2 \leftrightarrow CH_4 + H_2O$

- **Gasificación:** a diferencia del paso anterior, esta se da en condiciones pobres de  $O_2$ , es decir, moles de oxígeno menores a las estequiométricas. Esto se mide con lo que se conoce como Relación de Equivalencia o ER por sus siglas en inglés. Para la gasificación, la relación de equivalencia debe ser menor a 0,5 [9]. Las reacciones que se llevan a cabo en este paso del proceso, son las más importantes ya que definen la composición del gas resultante. Estas reacciones se pueden ver en la Tabla 2-2. Cabe resaltar que todas estas reacciones son de carácter endotérmico y para mantenerlas en curso debe haber una fuente de energía que mantenga estas reacciones; esta puede ser directa, debido a la energía liberada por la reacción de oxidación, o puede ser indirecta, cuándo el agente externo o portador de energía se encarga de brindar el calor necesario.

La gasificación de biomasa es muy similar a la gasificación de carbón mineral, produciendo los mismos gases y generando los mismos residuos sólidos. Sin embargo, existen algunas diferencias. La gasificación de biomasa sucede bajo condiciones de reacciones menos severas, presenta una mayor cantidad de material volátil y el carbonizado de la biomasa es más reactivo que el carbonizado del carbón [61].

El proceso de gasificación se lleva a cabo en un reactor llamado gasificador. Existen diferentes tecnologías para el funcionamiento y operación de un gasificador. Estas se diferencian principalmente por cómo se da la interacción sólido – gas [9]. Según lo anteriormente mencionado, los gasificadores se pueden clasificar en principalmente tres tipos: gasificador en lecho fijo, gasificadores en lecho fluidizado y reactores de flujo en arrastre. En la Figura 2-4 se puede ver un esquema de cada una de las tecnologías.

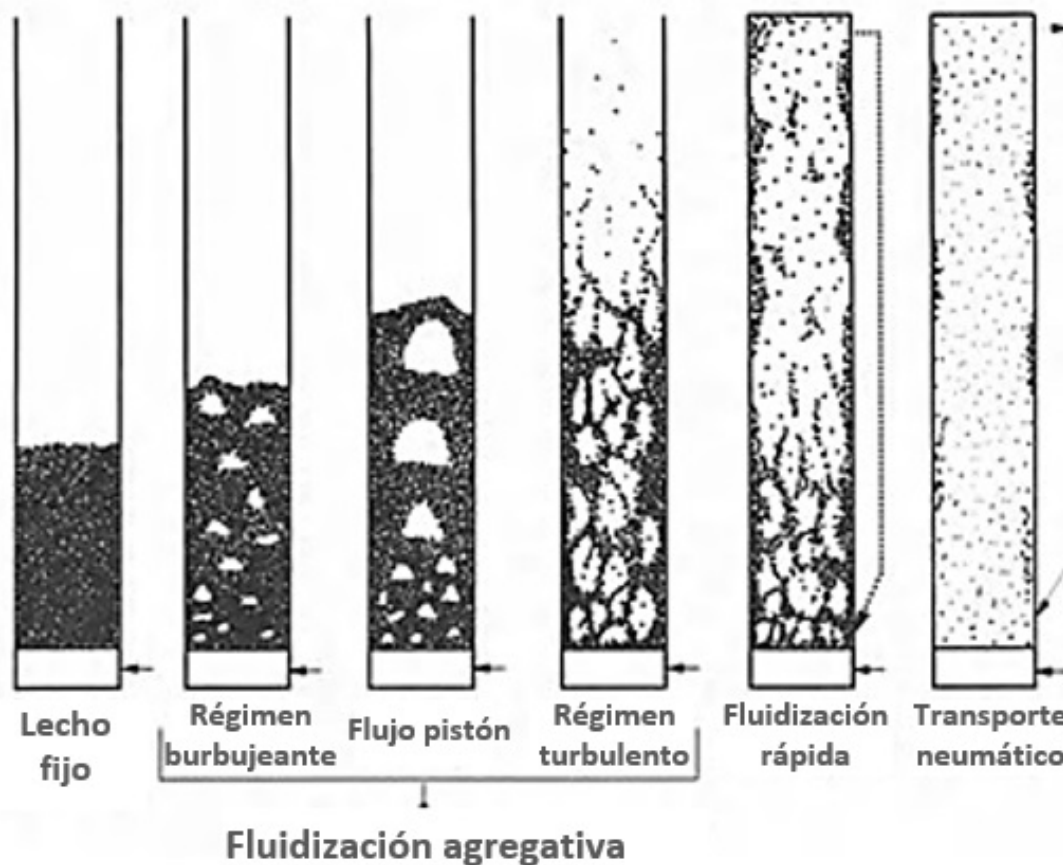


**Figura 2-4.:** Tecnologías de gasificación. Modificada a partir de [59]

En los gasificadores en lecho fluidizado, las partículas del material que componen el lecho se mantienen semi-suspendidas (estado de fluidización) debido al paso del agente gasificante a través de ellas, con una velocidad en donde la fuerza de empuje del agente gasificante, alcance o supere el peso de las partículas del lecho. Los gasificadores en lecho fluidizado se caracterizan por su excelente estado de mezcla y por una temperatura uniforme a través del reactor [9]. Generalmente, la gasificación de biomasa en lecho fluidizado se debe asistir mediante un material inerte que ayude a su fluidización, debido a que por su forma y densidad no es apropiada para este proceso. Este tipo de gasificadores operan a temperaturas entre 600°C y 850°C, con el objetivo de evitar la fusión de cenizas que causan aglomerados dentro del reactor y hacen que se pierda el estado de

fluidización [62]. Adicionalmente, este tipo de gasificadores presentan una gran ventaja en cuanto a su amplio rango de aceptación en materia prima con respecto a parámetros como tamaño de partícula, contenido de humedad y contenido de ceniza [62].

Los gasificadores en lecho fluidizado se subdividen en principalmente dos tipos: de lecho burbujeante (BFB) y lecho circulante (CFB); estos pueden tener una capacidad de hasta 100 MWh y se diferencian principalmente por las velocidades a las que operan, que generan regímenes de fluidización diferentes (ver Figura 2-5). Debido a que los dos operan a grandes velocidades, en general, el gas resultante de ésta tecnología presenta mayor cantidad de sólidos y alquitranes [59].



**Figura 2-5.:** Regímenes de fluidización. Tomada de [63]

El lecho fluidizado burbujeante es una de las tecnologías más viejas usadas comercial-

mente y es la tecnología preferida para la gasificación de biomasa [9],[62]. Los BFB operan a velocidades bajas comparadas con las de los CFB. El régimen de fluidización que se trabaja en este tipo de reactores es el de régimen burbujeante (ver Figura 2-5). En este régimen el gas entra por la parte inferior del reactor y fluye a través del lecho como burbujas, mientras el lecho se mantiene en un estado de mínima fluidización [64], en donde todas las partículas más pesadas que las partículas del lecho se mantendrán en la parte más baja (jetsam) y las más livianas subirán (flotsam); este régimen se asemeja mucho al de un líquido en estado de ebullición [65].

Por otro lado, los reactores en lecho fluidizado circulante trabajan a velocidades tan altas que arrastran el material. La tecnología consiste en que el material es arrastrado, formando un flujo de gas y partículas que pasan por un ciclón y son devueltos nuevamente al reactor [60], [62]. Lo anterior genera altos tiempos de residencia de las partículas dentro del reactor, y por lo tanto genera conversiones más altas de carbón [9].

### 2.2.2. Generalidades de la fluidización

Según Levenspiel [64], “la fluidización es la operación en la cual partículas sólidas son transformadas en un estado semejante al de un fluido a través de la suspensión en un gas o un líquido”. Cuando un fluido atraviesa un lecho de partículas a velocidades bajas, éste pasa a través de los espacios que quedan libres entre partículas; a esto se le conoce como lecho fijo. A medida que la velocidad aumenta, las partículas empiezan a moverse hasta que llega un momento en el cuál el empuje del fluido supera al peso de las partículas, que quedan suspendidas, y la caída de presión en cualquier parte del lecho es igual al peso de las partículas [64]. A esta condición se le conoce como condición mínima de fluidización.

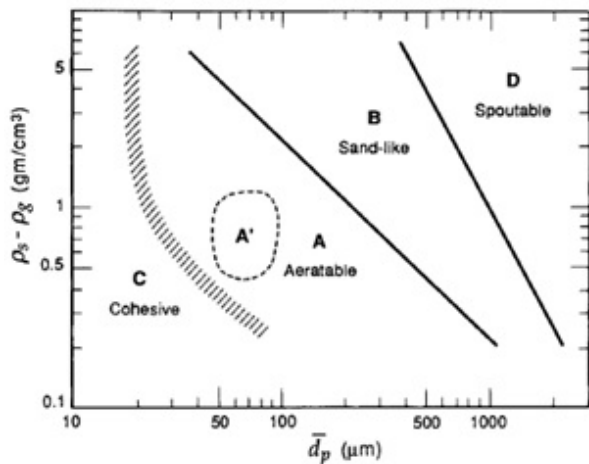
En general los sistemas sólido-gas se comportan de manera diferente a medida que aumenta la velocidad del gas, sobrepasando la velocidad mínima, entrando a diferentes estados o regímenes de fluidización (Figura 2-5). En un principio el gas empieza a generar canales entre el lecho de partículas, expandiéndolo. Seguido de esto, superado el estado de mínima fluidización, las partículas empiezan a agitarse debido al paso del gas entre



ellas; este paso se da en forma de burbujas y por esto se le conoce como régimen burbujeante. Una vez formado el régimen burbujeante, a medida que la velocidad incrementa, las burbujas crecen y se unen para formar burbujas de mayor tamaño. En un punto determinado las burbujas son tan grandes que ocupan toda la región transversal del reactor, empujando las partículas que se encuentran sobre ellas en forma de pistón; debido a esto, a este régimen se le conoce como flujo pistón o flujo “slugging”. Finalmente, cuando la velocidad aumenta tanto que supera la velocidad terminal de las partículas, se da el arrastre de las mismas, generando lo que se conoce como fluidización rápida y arrastre neumático [64].

### Clasificación de partículas

La fluidización sólido - gas depende mucho del tipo de sólido que se esté usando, esto quiere decir, como se caracteriza en cuanto a su tamaño de partícula, su densidad y su geometría [65]. Geldart [66] analizó el comportamiento de varios sólidos frente al paso de un gas entre ellos y clasificó a sus partículas en 4 grupos principales, que se caracterizan por su diferencia en densidad con respecto al gas que pasa entre ellas y por su diámetro de partícula promedio. La Tabla 2.2.2 y la Figura 2-6 dan una idea resumida de estos 4 grupos de partículas.



**Figura 2-6.:** Clasificación Geldart de partículas. Tomada de [64]

Clasificación	Característica
Grupo A	Materiales con tamaño de partícula pequeños y baja densidad de partícula ( $<1,4 \text{ g/cm}^3$ ). Estos son fáciles de fluidizar, con una velocidad baja de fluidización y sin la formación de burbujas de gran tamaño a altas velocidades
Grupo B	Este tipo de partículas son todos los tipos de arenas de tamaños de partícula entre $0,04 \text{ mm}$ y $0,5 \text{ mm}$ y densidades superiores a $1,4 \text{ g/cm}^3$ . Estos sólidos presentan una buena fluidización, con un comportamiento agresivo de las burbujas y con un crecimiento importante de las mismas con aumentos en la velocidad.
Grupo C	Materiales muy finos. Una fluidización normal es muy difícil en este tipo de sólidos porque las fuerzas entre partículas son más fuertes de las que ejerce el gas.
Grupo D	Partículas grandes y/o densas difíciles de fluidizar. Su comportamiento es errático, por lo que se pueden formar burbujas de un gran tamaño o canales entre el lecho.

**Tabla 2-3.:** Clasificación Geldart de partículas. Basado en [64]

### Velocidad mínima de fluidización

La velocidad mínima de fluidización es la velocidad a la cual las fuerzas de arrastre ejercidas por el gas fluidizante superan al peso de las partículas [64]. Existen métodos teóricos y empíricos para calcular la velocidad mínima de fluidización de un material. El método teórico es descrito por la siguiente ecuación:

$$\frac{1,75}{(\epsilon_{mf}^3)} * \frac{((d_p u_{mf} \rho_g))}{\mu^2} + 150 \frac{(1 - \epsilon_{mf}) (d_p u_{mf} \rho_g)}{(\epsilon_{mf}^3 \varphi_s^2)} \frac{1}{\mu} = \frac{(d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g)}{\mu} \quad (2-1)$$

Dónde:

$u_{mf}$ : Velocidad mínima de fluidización [m/s]

$d_p$ : Tamaño de partícula promedio del material [m]

$\epsilon_{mf}$ : Espacio libre de sólidos [-]

$\mu$ : Viscosidad del gas [cp]

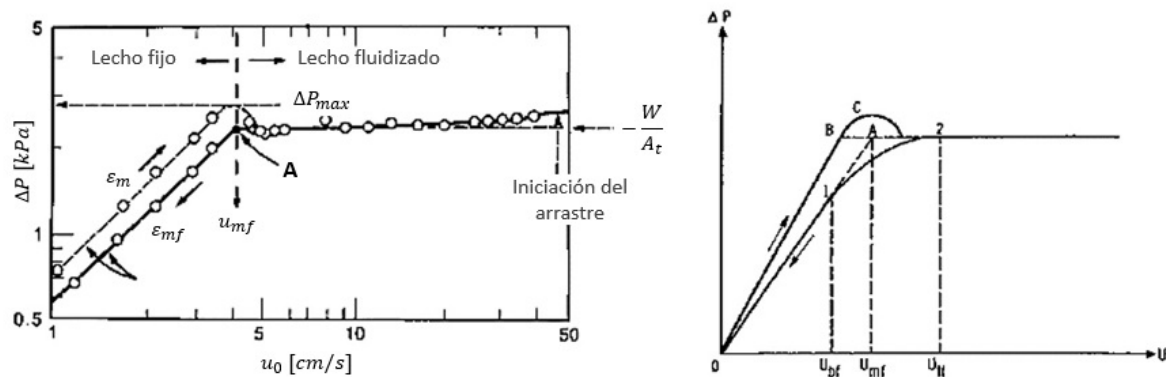
$\rho_g$  y  $\rho_s$ : Densidad del gas y del sólido respectivamente [kg/m<sup>3</sup>]

$\varphi_s$ : Esfericidad de las partículas sólidas [-]

Esta ecuación puede presentar varias modificaciones dependiendo de consideraciones que se pueden tomar para cada material y sus características fluido dinámicas.

Por otro lado, el método empírico se basa en que, en el momento que las partículas superan el estado de mínima fluidización y empieza la formación de burbujas, la caída de presión en el lecho disminuye y seguido se mantienen constante a medida que aumenta la velocidad. Esto se puede observar en la Figura 2-7. La velocidad mínima de fluidización puede encontrarse en el intercepto de la recta que forman los puntos en la caída de presión para el lecho fijo y la recta horizontal que forman los puntos sobre la velocidad mínima de fluidización. Es muy importante tener en cuenta que estos son métodos generalizados y que dependiendo del material trabajado pueden representar o no los fenómenos fluido dinámicos presentes en el lecho.

Por sus características de baja densidad de bulto y tamaños y formas diferentes, la biomasa es muy difícil de fluidizar, por lo tanto la fluidización de biomasa (en general partícu-



**Figura 2-7.:** Determinación de la velocidad mínima de fluidización a través de la gráfica  $\Delta P$  vs  $u$ . Tomada de [64] y [65]

las D) debe ser asistida por una material inerte, en general, arena (partículas B) [67]–[69]. Existen varios estudios que evalúan las características fluidodinámicas de la cascarilla de arroz. Rao et al. [70] encontraron las velocidades mínimas de fluidización de las cascarilla de arroz y evaluaron su grado de segregación para una proporción másica de cascarilla – arena de 1:13, con diferentes tamaños de partícula de arena (0.4 mm, 0.66 mm y 0.96mm). Obtuvieron que el menor grado de segregación de las partículas se da cuándo para los tamaños de 0.4 mm y 0.66 mm, con velocidades mínimas de fluidización de 0.45 y 0.52 m/s respectivamente. Por otro lado, Qiaoqun et al. [68] estudiaron las características fluido-dinámicas de la cascarilla de arroz con tamaño de arena de 0.36 mm y 0.7 mm obteniendo velocidades mínimas de fluidización de 0.32 y 0.44 m/s para cada valor. Adicionalmente, varios estudios muestran que el intervalo ideal en el porcentaje másico de la biomasa en la arena es de aproximadamente un 10 % [67], [69], [71], [72].

Cuándo se habla de partículas más grandes como los pélets de biomasa, las condiciones fluidodinámicas cambian. Esto se debe a la uniformidad en forma, tamaño y mayor densidad que presentan los pélets; características que hacen que su comportamiento en un lecho fluidizado sea más predecible y estable [69]. Fotovat et al. [73] estudiaron a detalle la fluidización en régimen burbujeante de partículas cilíndricas y esféricas asistidas con arena. Encontraron que las partículas cilíndricas rompen las burbujas haciendo que estas

se mantengan en un tamaño reducido y evitando el flujo pistón.

### 2.2.3. Parámetros que evalúan el desempeño del proceso de gasificación

Para evaluar el desempeño del proceso de gasificación, existen indicadores que miden el comportamiento de proceso respecto a diferentes aspectos. Entre estos parámetros se tiene:

- **Eficiencia de gas frío (CGE):** Se refiere a la relación del potencial energético del alimento sobre la potencia energética que se obtiene en el proceso.

$$\eta_{CGE} = \frac{Q_g M_g}{LHV_f M_f} \quad (2-2)$$

De dónde:

$M_f$ : Masa de combustible alimentado al reactor

$M_g$ : Masa de combustible obtenido en el proceso

$LHV_f$ : Poder calorífico del combustible alimentado

$Q_g$ : Poder calorífico del gas generado

- **Conversión de carbón:** Se refiere al carbón transformado durante el proceso.

$$\eta_C = 1 - \frac{M_{C-out}}{M_{C-in}} \quad (2-3)$$

De dónde:

$M_{C-in}$ : Moles de carbono entrando al reactor

$M_{C-out}$ : Moles de carbono saliendo del reactor

- **Contenido de alquitranes:** Se refiere al contenido de hidrocarburos de cadenas largas que se condensan a bajas temperaturas. Debido a la utilización post proceso del gas generado en la gasificación, las cantidades de alquitranes están determinadas por su uso debido a que puede ocasionar problemas en los equipos con el que se llevan a cabo estos procesos. Algunos ejemplos de límite de contenido de alquitranes en el gas generado se pueden ver en la Tabla 2-4.

**Tabla 2-4.:** Contenido de tar en el gas generado dependiendo de su aplicación

Aplicación	Alquitrán [g/Nm <sup>3</sup> ]
Combustión directa	No se especifica
Turbina de gas	0,1
Motor de combustión interna	0,05-5
Transporte por tubería	50-100
Celdas de combustible	<1

- **Composición del gas producto:** Se refiere al porcentaje en volumen de  $O_2$ ,  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $N_2$  en el gas que se produce en el proceso de gasificación. De aquí es destacable la relación  $H_2/CO$  debido a la importancia para la producción de productos derivados.

#### 2.2.4. Estudio de la gasificación de biomasa en lecho fluidizado

El proceso de gasificación es motivo de diferentes estudios que ayudan al entendimiento completo de las variables que afectan este proceso. Dadas las ventajas que presenta la biomasa como desecho agroindustrial en su aprovechamiento para obtención de energía bajo el proceso de gasificación, en los últimos años se han desarrollado varios estudios centrados en la gasificación de este tipo de materiales. Específicamente, la cascarilla de arroz, empieza a posicionarse por su disponibilidad y por el beneficio ambiental que genera el aprovechamiento de residuos de la agroindustria. De este modo, varios autores han estudiado el potencial que tiene la cascarilla de arroz para la gasificación. Zhao et al. [74] estudiaron la gasificación de cascarilla de arroz en un gasificador de tipo ciclónico que ayuda a la reducción en la generación de alquitrán, que es uno de los problemas que afronta la gasificación de biomasa. S. J. Yoon et al. [75] estudiaron el cambio que genera la adición de pélets de cascarilla de arroz sobre los diferentes productos del proceso de gasificación en un reactor de lecho fijo de corriente descendente. Además, R. Khonde y A. Chaurasia [76] estudiaron la generación de gas de síntesis rico en hidrógeno a partir del rompimiento de partículas de alquitrán generado en un proceso de gasificación en lecho

fijo.

Para el caso específico de la tecnología de lecho fluidizado, los estudios principalmente se centran en el efecto de la variación de parámetros del proceso como la temperatura, tamaño de partícula, relación agente gasificante y combustible, material alimentado [77]–[80],[81],[82]; sobre productos del proceso como concentración de gas de síntesis, poder calorífico de gas resultante, conversión de carbón, eficiencia de gas frío, eficiencia térmica y generación de tar.

Trabajos como los de J. W. Kook et al. [83], J. P. Makwana et al. [84], M. Thakar et al. [85], C. Loha [86] evalúan el efecto que tiene la modificación de parámetros como la temperatura, relación de equivalencia y en algunos casos el flujo de alimentación sobre los indicadores mencionados anteriormente. Las conclusiones generales que se tienen a partir de estos estudios es que la generación de alquitrán disminuye a altas temperaturas y mayores valores de ER, debido al rompimiento de las moléculas que componen el alquitrán. Por otro lado, el poder calorífico del gas generado disminuye con el aumento de ER, principalmente debido a que se da una disminución de la producción de  $H_2$  y  $CO$  por el cambio en el equilibrio químico de las reacciones en los cuáles se encuentran presentes estos compuestos. Además, la eficiencia de gas frío aumenta con el aumento de la temperatura y disminuye con el aumento de ER. Esto se explica por los mismos efectos ya mencionados para ER con respecto a las producciones de  $H_2$  y  $CO$ , que para el aumento de la temperatura son contrarios porque las diferentes reacciones de dónde se producen estos reactivos son endotérmicas, y por lo tanto se verán potenciadas con el aumento de la temperatura; caso contrario con las reacciones en donde se consumen que son exotérmicas y que se verán afectadas por la temperatura.

Como se mencionó anteriormente, el tamaño de partícula del material alimentado al reactor también será de gran relevancia para el desempeño del gasificador. En los resultados encontrados en la literatura, no se encuentra la modificación en forma de pélets de este parámetro para la gasificación de cascarilla de arroz en lecho fluidizado. Sin embargo, es

importante conocer de qué manera afecta este factor en el desempeño del proceso para otro tipo de biomásas. Si bien los resultados para algunos casos no van a ser comparables, algunos de ellos se podrán extrapolar al problema presentado para que sirvan como guía de análisis en los resultados que se obtendrán durante el estudio a realizar.

V. Wilk y H. Hofbauer [87] y E. Kurkela et al. [88] estudiaron el efecto del tamaño de partícula en un reactor de lecho fluidizado para residuos de madera. Encontraron que la producción de  $H_2$  se ve afectada negativamente, y las concentraciones de  $CO$  y  $CO_2$  se benefician a medida que aumenta el tamaño de partícula. Estos resultados se dan por el equilibrio de la reacción gas – agua, que se desfavorece con la disminución del tamaño de partícula debido a que la partícula se consume a una velocidad más alta. Esto no pasa para partículas más grandes, en dónde el equilibrio de la reacción gas – agua tiende hacia sus productos, teniendo mayor presencia de  $H_2$  en el gas resultante. Adicionalmente, se habla de que la geometría de la biomasa podría ser otra razón para el resultado encontrado. Se conoce que partículas circulares tardan más en consumirse que partículas de otras geometrías. Finalmente, se resalta que se da una disminución de alquitrán en el gas resultante a medida que el tamaño de partícula aumenta.

A. Alzate y F. Chejne [89], plantean la co-gasificación en un reactor de lecho fluidizado para residuos de madera. Realizan la co-gasificación de pélets en un lecho de carbón y la gasificación de pélets en un lecho de residuos de madera y de carbón. Encuentran, que la sinergia que sucede de la gasificación de pélets compuestos de biomasa y carbón supera a la de la co-gasificación de los mismos pero separados físicamente, obteniendo mejores conversiones de carbón y un gas con mayor poder calorífico.

Algunos efectos adicionales que pueden causar cambios en el tamaño de partícula y geometría para la gasificación de biomasa en lecho fluidizado, pueden ser el tiempo de desvolatilización, que es mayor cuando se tienen partículas más cercanas a una esfera y que hace que se den producciones mayores de alquitrán y menor producción de gas de síntesis [90].

Si bien hay una amplia variedad de estudios en cuanto a la gasificación de biomasa en un reactor de lecho fluidizado, teniendo en cuenta el tamaño de partícula, solo se encontró un artículo que estudia el efecto de la adición de biomasa peletizada con respecto a la biomasa desagregada para el rendimiento general del proceso. B. Bronson et al. [91] estudia la gasificación de residuos forestales en forma desagregada y compara los resultados obtenidos con la gasificación de la misma biomasa en forma de pélets. Los resultados generales que se obtienen hablan de que los tamaños de partículas pequeños tienen un efecto negativo respecto a la generación de alquitrán, conversión de carbón y eficiencia de gas frío. Principalmente por la elutriación de partículas causadas por la baja densidad y dureza, que son características de la biomasa. Además, los pélets presentan una mayor producción de hidrógeno en el gas resultante. La explicación a esto se da por medio del equilibrio de la reacción gas – agua, que tiende hacia los reactivos a causa del cambio en los mecanismo de reacción, dónde se tiene una volatilización casi instantánea para las partículas pequeñas, y una volatilización en diferentes etapas para los pélets. De esta manera, para los pélets se tiene que el lento consumo de la partícula lleva a la formación de char en la superficie sin que se haya terminado de volatilizar en el interior. Así, los gases de pirólisis que pasan por el carbonizado caliente pueden presentar rompimiento de moléculas o cambios en los equilibrios de reacción que lleven a cambios en los productos resultantes.



## 3. Metodología

La metodología presentada a continuación muestra los experimentos realizados en el laboratorio de Ciencias de la Energía perteneciente al grupo de investigación Termodinámica Aplicada y Energías Alternativas (TAYEA), ubicado en el campus Robledo de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.

### 3.1. Preparación y caracterización de la biomasa

La cascarilla de arroz (CA) se trae desde una zona del departamento de Antioquia (Figura 3-1a). Una vez recibida se expone de radiación solar para secar el exceso de humedad y se procede a realizar procesos de molienda, tamizado, caracterización fisicoquímica (análisis próximo y último) y caracterización lignocelulósica.

#### 3.1.1. Molienda

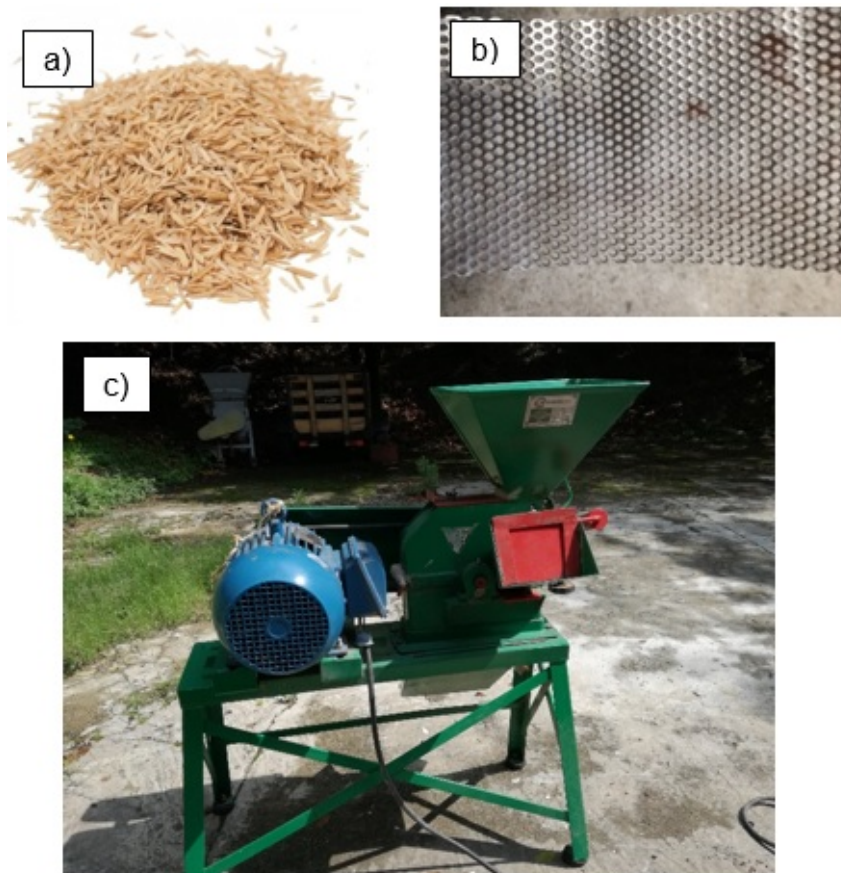
La reducción de tamaño se realizó con un molino de martillos basculantes de 6500 rpm con una malla de orificio 2 mm (Figura 3-1b y Figura 3-1c). Se molieron un total de 10 kg.

#### 3.1.2. Tamizado

Una vez molido, se toma una muestra de 1 kg del material resultante y se caracteriza mediante granulometría en un equipo conocido como RO-TAP. Aquí se usaron 4 tamices ASTM de tamaño No. 8, No. 12, No. 20 y No. 30 en orden descendente. El proceso consistió en agregar la biomasa en el tamiz más grande (No. 8), agitar durante 10 min y pesar lo retenido en cada uno de los tamices. Los resultados obtenidos y la distribución

de tamaño de partícula se pueden ver en la Tabla 3-1. Adicionalmente, imágenes de los diferentes tamaños de partícula se pueden observar en la Figura 3-2.

**Figura 3-1.:** a) Cascarilla de arroz cruda. b) Malla de molino 2 mm. c) Molino usado para reducción de tamaño.



**Tabla 3-1.:** Distribución granulométrica de la cascarilla de arroz

Tamiz	Abertura [mm]	Abertura promedio [mm]	Masa retenida [g]	% Masa retenida
No. 8	2,36	>2,36	9,35	0,94 %
No.12	1	1,68	147,65	14,77 %
No. 20	0,85	0,93	547,4	54,74 %
No. 30	0,6	0,73	156,55	15,66 %
Recolector		<0,60	139,05	13,91 %
Total			1000	100,00 %



Figura 3-2.: Distribución de tamaño de partícula de la cascarilla de arroz

### 3.1.3. Caracterización físico-química

En la caracterización físico-química de la biomasa se realizaron pruebas para encontrar propiedades de la biomasa como: densidad de bulto, poder calorífico, composición elemental, análisis próximo y composición lignocelulósica.

- **Densidad de bulto:** La densidad de bulto se determinó a partir de lo dictado en las normas ASTM C127-04 en dónde se describe un ensayo para determinar la densidad con el uso de la medida del peso que ocupa la biomasa en un volumen determinado medido en una probeta graduada.
- **Análisis próximo:** En el análisis próximo se determina los porcentajes máxicos de material volátil, humedad residual, carbono fijo y cenizas con el objetivo de ver la calidad energética de la biomasa. Para este análisis, una muestra de cascarilla de arroz se sometió a un proceso de molienda hasta reducir el tamaño de partícula a 250  $\mu\text{m}$ . Se siguieron las normas: ASTM D3173-11 para el contenido de humedad, ASTM

D3175-11 para determinar el material volátil, ASTM D3174-12 para contenido de cenizas y ASTM D3172 para cuantificar el carbono fijo.

**Tabla 3-2.:** Caracterización fisicoquímica de la cascarilla de arroz

Caracterización de cascarilla de arroz			
Propiedad	Unidad	Norma	Valor
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	ASTM C127-04	158,5
Poder calorífico superior <sup>bs</sup>	kJ/kg	ASTM D5865-13	14089
Análisis último <sup>bs</sup>			
C	%p/p	ASTM D5373	33,87
H	%p/p		4,57
N	%p/p		0,84
S	%p/p	ASTM D4239	0,12
O*	%p/p	-	41,48
Análisis próximo <sup>bs</sup>			
Humedad <sup>bh</sup>	%p/p	ASTM D3173-11	6,92
Ceniza	%p/p	ASTM D3175-11	17,9
Material volátil	%p/p	ASTM D3174-12	55,85
Carbono fijo	%p/p	ASTM D3172	19,33
Composición lignocelulósica <sup>bs</sup>			
Lignina	%p/p	NERL/TP-510-42618	26,32
Hemicelulosa	%p/p		42,59
Celulosa	%p/p		31,08

\* Calculado por diferencia

- **Análisis último:** Conocido también como análisis elemental, determina la cantidad porcentual másica de carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N), azufre (S), oxígeno (O) dentro de la biomasa. El proceso se realiza siguiendo la norma ASTM D5373, con lo que se determina el contenido de C, H y N haciendo uso de un Analizador Elemental Exeter CE-440. Seguido de esto se determina la cantidad de azufre en la muestra siguiendo la norma ASTM D4239-14. Una vez obtenidos los resultados de estos análisis se determina la cantidad de oxígeno por diferencia de peso, teniendo en cuenta que la suma de los porcentaje debe resultar en un 100 %.

- **Poder calorífico superior:** El poder calorífico o HHV (High Heating Value) por sus siglas en inglés, describe la energía real contenida en el combustible por unidad de masa teniendo en cuenta la liberación de humedad. Para determinar el poder calorífico de una muestra se usa una bomba calorimétrica siguiendo la norma ASTM D5865-13.
- **Composición lignocelulósica:** La composición lignocelulósica habla del contenido porcentual en peso del contenido de lignina, celulosa y hemicelulosa presentes en la biomasa. Este análisis se realiza siguiendo la normativa NERL/TP-510-42618. El resultado de todos los análisis se resume en la Tabla 3-2.

#### 3.1.4. Caracterización de la glicerina

“El glicerol es un compuesto químico básico obtenido principalmente como co producto en la industria oleoquímica, mientras que la glicerina es el nombre comercial que reciben las mezclas con alto contenido de glicerol. Naturalmente, el glicerol se presenta de forma combinada como triglicéridos en todas las grasas animales y aceites vegetales; esto es, constituye en promedio alrededor del 10 % de estos materiales. Dicho componente se obtiene a partir de las grasas y aceites durante la producción de ácidos grasos y jabón, así como en los procesos de transesterificación con alcoholes, por medio de los cuales se produce biodiesel” [92].

El potencial crecimiento de la industria del biodiesel en los años venideros, generará la producción de residuos como la glicerina. Se estima que por cada 10 kg de biodiesel, se produce 1 kg de glicerina [93]. Una buena opción para el uso de este residuo puede ser su implementación en la producción de pélets, ya que éste actúa como un aditivo incrementando el poder calorífico y genera beneficios en el proceso debido a sus propiedades lubricantes [94].

La glicerina fue suministrada por la empresa BioCD (Biocombustibles y Derivados S.A.S) ubicada en el departamento de Antioquia. Esta glicerina es residuo del proceso de pro-

**Tabla 3-3.:** Caracterización de la glicerina

Criterio	Resultado
Contenido agua [ %]	1,96
Contenido de glicerol [ %]	49,34
Índice de acidez [MgKOH/gmuestra]	0,38
Contenido de éster [ %]	18,2
Contenido de metanol [ %]	5,4
% C	47,13
% H	9,58
% N	0,55

ducción de biodiesel en la industrial del aceite de palma. La caracterización de la glicerina se puede ver en la Tabla 3-3.

## 3.2. Peletización de cascarilla de arroz

Antes de proponer un diseño de experimentos para la peletización de la cascarilla de arroz se realizó una revisión al estado del arte con el objetivo de definir parámetros a variar en el estudio, teniendo en cuenta las condiciones experimentales con respecto a equipos y material de trabajo.

### 3.2.1. Equipo de peletización

Para este estudio se utilizó una peletizadora eléctrica escala industrial con la ficha técnica descrita en la Tabla 3-1. Una imagen del equipo se puede observar en la Figura 3-3.

Se debe tener en cuenta que la peletizadora no presenta sensores de temperatura y presión, y por lo tanto tampoco presenta un sistema de control de los mismos. Si bien la presión se puede cambiar usando dos tornillos que presionan los rodillos contra la matriz a diferentes niveles, por estudios realizados anteriormente en el grupo de investigación,

se define una presión constante. En cuanto la temperatura, se conoce que esta dependerá de la biomasa, de la cantidad de humedad, del régimen de alimentación y del tiempo de la prueba de peletizado, sin embargo, por estudios anteriores se sabe que puede variar entre 40°C y 90°C.

Lo anterior deja algunos parámetros para el estudio de los pélets producidos con este tipo de peletizadora. Por lo tanto, los parámetros a variar son: la cantidad de humedad de la biomasa, el tamaño de partícula y un aglomerante adicionado. De esta manera, se estudiarán los efectos de estas tres variables sobre los parámetros de calidad de los pélets descritos en el capítulo anterior.

### **3.2.2. Plan de experimentos**

Conociendo los parámetros que se pueden variar en el equipo de peletización usado, se realiza una revisión al estado del arte de la peletización de biomasa teniendo en cuenta los estudios donde se varíen el diámetro de partícula y cantidad de humedad, analizando su efecto sobre la densidad de bulto y la durabilidad principalmente. Lo anterior se realizó con el fin de definir los valores para dichas variables en este estudio. En la Tabla A-2 se encuentra la revisión que se hizo del estado del arte teniendo en cuenta que las condiciones de variables como la temperatura, presión, geometría de la matriz estén en valores similares a los que se presentan para el equipo a usar.

Basado en lo que se muestra en la tabla, se decidió realizar un plan de experimentos de tipo aleatorio, con 3 factores, porcentaje de humedad, tamaño de partícula y cantidad de glicerina, con 2, 4 y 2 niveles respectivamente. La Tabla 3-5 muestra las mezclas preparadas para las pruebas de peletización. Cada una de estas pruebas de peletización se realizó por duplicado para verificar la validez de los resultados.

**Figura 3-3.:** Equipo de peletización. a) Matriz, b) Rodillo, c) Montaje completo



**Tabla 3-4.:** Ficha técnica del equipo de peletización

Equipo de peletización	
Tipo	Matriz plana - rodillos fijos
Peso [kg]	230
Capacidad [kg/h]	250
Motor	
Voltaje [V]	220 - 440
Potencia [kW]	7,5
Geometría matriz	
Diámetro [mm]	210
Número de agujeros [ - ]	102
Diámetro de agujeros [mm]	8
Longitud de agujeros [mm]	10

**Tabla 3-5.:** Mezclas para peletización preparadas

Muestra	Malla	Tamaño	Mezcla		Pesos mezcla	
		de partícula [mm]	% Biomasa	% Agua - Aglomerante	Biomasa [g]	Agua - Aglomerante [g]
CAR1210	P8/R12	1,68	90 %	10 % - 0 %	1000	111,1 - 0
CAR2010	P12/R20	0,93	90 %	10 % - 0 %	1000	111,1 - 0
CAR3010	P20/R30	0,73	90 %	10 % - 0 %	1000	111,1 - 0
CAP3010	P30	<0,60	90 %	10 % - 0 %	1000	111,1 - 0
CAR1215	P8/R12	1,68	85 %	15 %- 0 %	1000	176,5 - 0
CAR2015	P12/R20	0,93	85 %	15 % - 0 %	1000	176,5 - 0
CAR3015	P20/R30	0,73	85 %	15 % - 0 %	1000	176,5 - 0
CAP3015	P30	<0,60	85 %	15 % - 0 %	1000	176,5 - 0
CAR12G	P8/R12	1,68	90 %	10 % - 5 %	1000	111,1 – 65.4
CAR20G	P12/R20	0,93	90 %	10 % - 5 %	1000	111,1 – 65.4
CAR30G	P20/R30	0,73	90 %	10 % - 5 %	1000	111,1 – 65.4
CAP30G	P30	<0,60	90 %	10 % - 5 %	1000	111,1 – 65.4



### 3.2.3. Evaluación de la calidad de pélets de biomasa

La evaluación de la calidad de los pélets se realiza basado en lo visto en el estado del arte y los diferentes estándares presentados en la sección 2.1.5. Los parámetros de calidad que se evalúan son: rendimiento, distribución de tamaño de pélets, densidad de bulto, resistencia a la humedad, resistencia al impacto o durabilidad y humedad del pélet. Además de esto, se evaluarán parámetros del proceso como el rendimiento de producción de pélets y el consumo energético de la peletizadora. A continuación se describe cada uno de ellos.

#### Parámetros del proceso

- **Rendimiento (R):** El rendimiento se refiere a los gramos de pélets producidos por cada gramo de biomasa alimentada. Este parámetro es muy importante debido a que da una idea de que tan viable es la peletización de la biomasa a las condiciones evaluadas. Para esto se tomó un tamiz malla 5 (4 mm) para retener y separar los pélets de biomasa no peletizada o residuo. El rendimiento se calcula con el peso de biomasa peletizada retenida en el tamiz sobre el total de biomasa alimentada.

$$R = \frac{M_{pelets}}{M_{biomasa-alimentada}} * 100 \quad (3-1)$$

- **Consumo energético específico (CEE):** Para este parámetro se tomó el tiempo de las pruebas a un nivel de alimentación de biomasa en dónde el amperaje de la peletizadora estuviera entre 10 y 15A, con esto se calculó el valor de la potencia consumida por la peletizadora para dicha prueba y se divide entre el peso de pélets que se produjeron.

#### Parámetros de calidad

- **Distribución de tamaño de pélets (DP):** Se refiere a la distribución de la longitud de los pélets producidos. Este parámetro se evalúa debido a que la peletizadora no cuenta con una cuchilla que corte los pélets a un tamaño determinado. Además, por pruebas anteriores se pudo observar que los pélets presentan diferentes longitudes con una variabilidad en tamaño grande entre los 5 mm y 40 mm aproximadamente.

Por lo tanto, para la evaluación de este parámetro se tomó el peso de los pélets divididos en 4 intervalos:  $D < 10 \text{ mm}$ ,  $10 \text{ mm} < D < 20 \text{ mm}$ ,  $20 \text{ mm} < D < 30 \text{ mm}$  y  $30 \text{ mm} < D$ .

- **Densidad de bulto (DB):** Debido a que la producción de pélets no es la suficiente para medir este parámetros como lo indica la norma, la densidad de bulto se determinó pesando los pélets que caben en un recipiente de 200 ml. Cabe resaltar, que se tuvo en cuenta de que el recipiente tuviera un diámetro mayor a la longitud de los pélets, para evitar errores en las mediciones.
- **Resistencia al impacto (D):** Este parámetro es equivalente al de durabilidad, ya que simula las condiciones de transporte y almacenamiento a la que están expuestos los pélets de biomasa y por lo tanto junto con la densidad es un parámetro que define la calidad del pélet. Kaliyan y Monrey [49] mencionan que esta prueba puede usarse en comparación con los estándares establecidos para pélets. Esta prueba consiste en lanzar un pélet desde una altura de 1,8 metros sobre una superficie metálica. Seguido de esto se pesa el material retenido en una malla 30 (0.5 mm) y el resultado se divide sobre el peso inicial del pélet, de esta manera se obtiene el índice de durabilidad. Sin embargo, según lo estudiado por Oveisi [95] el daño ejercido sobre los pélets y por lo tanto su durabilidad dependen de la altura de la que se lanzan y de la cantidad de pélets en la bolsa, sin embargo, menciona que una cantidad de 100 g sería ideal para esta prueba. Además, Zapata [96] menciona en su trabajo que la durabilidad no se ve afectada estadísticamente, por el número de lanzamientos hasta un total de 10 lanzamientos; y define un valor de 5 lanzamientos.

Con lo mencionado anteriormente, la prueba a realizar consiste en lanzar 5 veces una bolsa con 100 g de pélets seleccionados aleatoriamente. Además este valor se tomará como Durabilidad para compararlo con los estándares internacionales establecidos.

$$D = \frac{M_{pelets-final}}{M_{pelets-inicial}} * 100 \quad (3-2)$$

- **Humedad de los pélets (M):** El contenido de agua en los pélets se determinó por medio de una balanza halógena, que relaciona el porcentaje de masa perdido durante calentamiento a una temperatura de 105 °C.
- **Poder calorífico, análisis último y próximo:** Estos parámetros se determinaron de la misma forma en la que se hizo para la biomasa cruda (ver sección 3.1.3).

### 3.2.4. Selección de las mejores condiciones de peletización

La selección de las mejores condiciones de peletización para la producción que los pélets que serán evaluados en el proceso de gasificación, se hace a partir de una ponderación por puntos, teniendo en cuenta los parámetros más importantes en cuanto al proceso de peletización y la calidad del pélet producido. Basado en la literatura y en la experiencia obtenida por el grupo de investigación en la peletización de biomasa, la Tabla 3-6 muestra los parámetros, con su respectivo peso, que serán tenidos en cuenta para la ponderación por puntos.

A continuación se describe cada uno de los parámetros seleccionados para la ponderación y se realiza una breve descripción de cómo se hará calificación respectiva para cada uno de ellos. Cabe resaltar que todos los parámetros estarán evaluados como puntaje máximo igual a 10.

#### Calidad del pélet

La calificación para la calidad del pélet con los parámetros de evaluación de la calidad del pélet descritos en la Tabla 2-1, si la el valor en cada parámetro del pélet cumplen con lo descrito en la norma Fpr EN 14961-6 se dará una calificación de 10, de lo contrario si calificación será 0.

- **Diámetro:** Se refiere al diámetro del pélet en milímetros.
- **Longitud del pélet:** Se refiere al porcentaje en peso de los pélets que presentan una longitud que cumple se encuentran en un funcionamiento ideal de la máquina.

**Tabla 3-6.:** Parámetros de ponderación para la selección de la mejor muestra

Aspecto evaluado	Peso	Parámetro	Peso
<b>Calidad del pélet</b>	70 %	Diámetro	5,00 %
		Longitud	10,00 %
		Densidad de bulto	20,00 %
		Resistencia al impacto	20,00 %
		Humedad	5,00 %
		Contenido de ceniza	10,00 %
		Poder calorífico	15,00 %
		% N	7,50 %
		% S	7,50 %
<b>Proceso de peletización</b>	30 %	Rendimiento	40,00 %
		Consumo energético	30,00 %
		Molienda y clasificación	30,00 %

- **Densidad de bulto:** Describe el peso de un conjunto de pélets ocupando un volumen específico. Descripción en la sección 3.2.3.
- **Durabilidad:** Es el porcentaje de finos ( $<0.35$  mm) en los pélets después de un test de impacto. Descripción en la sección 3.2.3.
- **Contenido de humedad:** Se refiere al porcentaje en peso de agua dentro del pélet. Descripción en la sección 3.2.3.
- **Contenido de ceniza:** Se refiere al porcentaje en peso del material inorgánico dentro del pélet. Descripción en la sección 3.2.3.

- **Poder calorífico:** Se refiere a la cantidad de energía por unidad de masa que tiene el pélet. Descripción en la sección 3.2.3.
- **Porcentaje de Nitrógeno:** Es el porcentaje en peso de Nitrógeno dentro de la biomasa. Descripción en la sección 3.1.3.
- **Porcentaje de Azufre:** Es el porcentaje en peso de Azufre dentro de la biomasa. Descripción en la sección 3.1.3.

### Proceso de peletización

La calificación para los parámetros tomados del proceso de peletización se califica de forma diferente para cada parámetro. A continuación se describe cada uno de los parámetros y su forma de calificación.

- **Rendimiento:** Se refiere al porcentaje en peso de los pélets producidos en cada una de las muestras. Para su calificación se toma el mayor valor, se divide cada valor de las mezclas por este y se multiplica por 10.
- **Consumo energético:** Se refiere al consumo energético realizado por la peletizadora para cada una de las muestras. Su calificación se realiza dividiendo el mayor valor de los valores inversos obtenidos para cada mezcla y multiplicado por 10.
- **Molienda y clasificación:** Hace referencia a la dificultad de moler y clasificar el tamaño de partícula del material crudo con el que se fabricó el pélet. En este sentido se le da un valor de 4 al material de tamaño de partícula 0.6 mm, 6 al tamaño 0.73 mm, 8 al tamaño 0.93 mm y 10 para el mayor tamaño de partícula 1.63 mm.

## 3.3. Gasificación de cascarilla de arroz

Con la gasificación de la cascarilla de arroz y los pélets de cascarilla de arroz se pretende estudiar el efecto que tiene la peletización sobre el desempeño del proceso en parámetros como la eficiencia térmica, conversión de carbón y composición del gas generado.

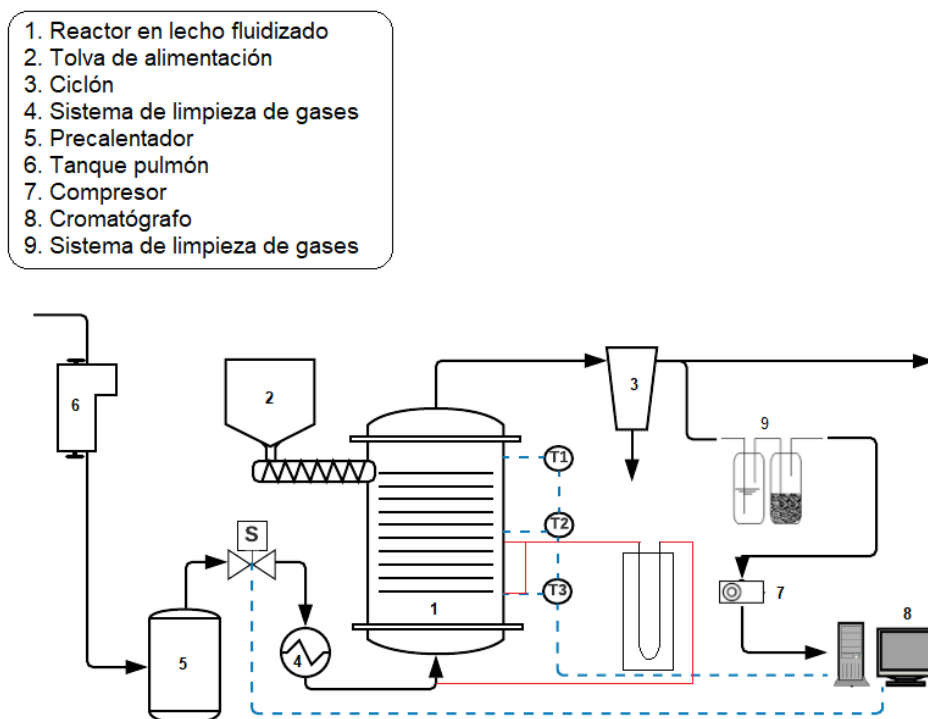
Para esto se realizaron pruebas de gasificación para la cascarilla de arroz cruda y la cascarilla de arroz peletizada. En esta sección se describe cómo se realizaron las pruebas de gasificación y cómo se analizaron cada uno de los parámetros analizados anteriormente.

### 3.3.1. Pruebas de gasificación

Para la gasificación de cascarilla de arroz, se usa un reactor a escala piloto calentado mediante tres resistencias eléctricas (1.5 kW cada una) y que trabaja en lecho fluidizado a una temperatura de 850 °C y presión atmosférica. El reactor está fabricado con acero inoxidable, con un diámetro y altura de lecho de 10 cm y 50 cm respectivamente; con una zona libre que presenta unas medidas de 14 cm de diámetro y 100 cm de altura. Adicionalmente, el reactor presenta un sistema de control PID usando termopares tipo K ubicados a través de toda la altura del reactor y se mide el diferencial de presión de la placa distribuidora y el lecho, usando un manómetro en U. El diagrama general del montaje usado para las pruebas de gasificación se puede apreciar en la Figura 3-4.

#### Descripción del proceso

En el proceso, el suministro de aire se hace a través de un compresor y un tanque pulmón, con una presión de aproximadamente 207 kPa. Seguido de esto el aire pasa a ser precalentado a una temperatura de 600 °C y enviado al reactor a través de tubería que se encuentra aislada térmicamente con lana de fibra de vidrio para evitar pérdidas. Por otro lado, la alimentación de los sólidos, en este caso cascarilla de arroz, se realiza mediante una tolva con un tornillo sin fin, ubicada en la parte superior del reactor. En cuanto a los gases, estos pasan a través del ciclón permitiendo recolectar el material particulado que se genera en el proceso. A la salida de este ciclón, el flujo de gas se divide en dos líneas, una que sale del proceso y otra que permite la recolección de los gases de muestra. Estos gases de muestra, primero pasan por un sistema de limpieza de dos cámaras compuestas por un solvente y sílica gel; seguidamente son llevados a un cromatógrafo de gases MicroGC Agilent Modelo 300 para ser analizados.



**Figura 3-4.:** Esquema del montaje para pruebas de gasificación

### Protocolo experimental

Para las pruebas de gasificación se sigue el siguiente protocolo experimental. Estas pruebas experimentales tienen una duración de 1 hora después de iniciada la alimentación de la biomasa.

1. Se inicia el paso de aire dejando un flujo de 10 L/min (STP).
2. Se encienden las resistencias del reactor y precalentador, esperando a que alcancen una temperatura de 850 °C y 600 °C respectivamente.
3. Se ajusta el paso de aire al flujo determinado para la respectiva prueba.
4. Se inicia la alimentación de biomasa ajustando la frecuencia del tornillo sin fin a un

valor determinado para obtener la masa de biomasa necesitada.

5. Una vez iniciada la prueba, se toman datos de temperatura del reactor, caída de presión del lecho, temperatura de gases de salida y flujo de aire.
6. Se da la recolección de gases de muestra cada 5 min y una recolección de cenizas del proceso obtenidas por rebose, cada 10 min.
7. Enfriamiento del reactor a temperatura ambiente.
8. Se toman pesos de material de salida (cenizas del proceso, cenizas de ciclón) y los residuos del material de entrada.
9. Análisis de las cenizas del proceso.

### 3.3.2. Cálculo de la velocidad mínima de fluidización

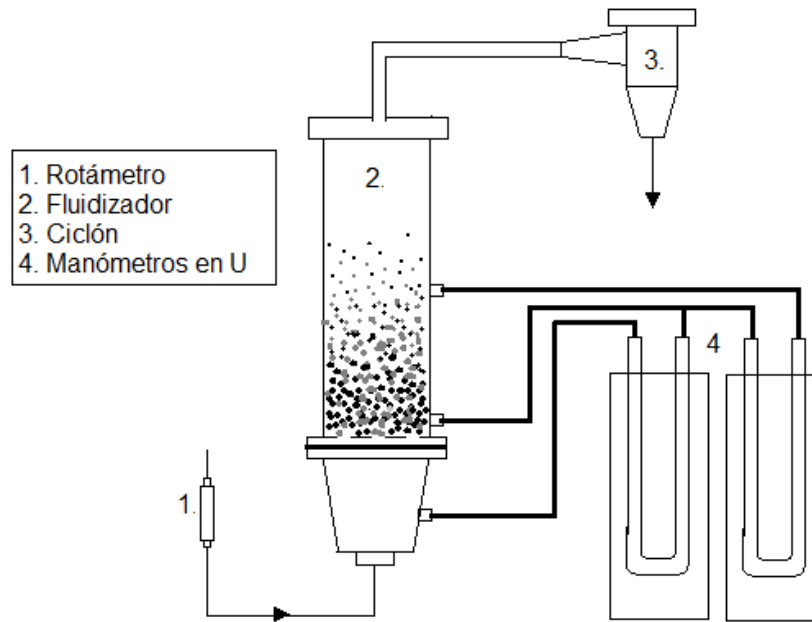
Es importante que antes de iniciar la prueba de gasificación se tengan claras las condiciones a las que se quiere trabajar. Se realizó un estudio fluidinámico tanto para el material peletizado como para la biomasa en su estado natural. Este estudio se llevó a cabo en frío en un fluidizador ubicado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad Nacional de Colombia. Aquí se pretende encontrar experimentalmente la velocidad mínima de fluidización tanto de los pélets como de la biomasa y dar una evaluación cualitativa del grado de segregación que se puede presentar. Un esquema del montaje experimental para estas pruebas se puede apreciar en la Figura 3-5.

Para las pruebas de fluidización se usaron los materiales que se muestran en la Tabla 3-7. El procedimiento que se siguió para la realización de las pruebas se describe a continuación:

1. Se carga el fluidizador con el material a evaluar.
2. Se da el paso de aire y se aumenta en 5 L/min (STP) y se toma la caída de presión en el lecho y la placa.



3. Se deja de aumentar el flujo cuándo la caída de presión en el lecho se vuelve constante.
4. Se disminuye el flujo y se toma la caída de presión del lecho y de la placa.



**Figura 3-5.:** Esquema del montaje de fluidización

**Tabla 3-7.:** Características de los materiales a fluidizar

Material	Densidad de bulto [ $kg/m^3$ ]	Tamaño de partícula [ $mm$ ]
Arena sílice	1400	0,73
Cascarilla de arroz	239	0,93
Pélets de cascarilla de arroz	636	8

Con este procedimiento se espera obtener una curva semejante a la de la Figura 2-7 y con esto obtener la velocidad mínima de fluidización. En el caso de los pélets se requiere ver el porcentaje más adecuado entre arena y pélets para operar en las pruebas de gasificación. Para esto se realizó este procedimiento para los porcentajes de 5 %, 10 %, y 15 %.

## **4. Resultados y discusión**

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos para los procesos experimentales realizados, tanto para el proceso de peletización como para la gasificación de cascarilla de arroz.

### **4.1. Peletización de cascarilla de arroz**

Si bien no se usó un aglomerante para la peletización de la cascarilla de arroz, se obtuvo que todas las muestras resultaron en la formación de pélets en mayor o menor medida. En la Figura 4-1 se muestran imágenes de los pélets obtenidos para cada una de las muestras descritas en la Tabla 3-5. En esta Figura se puede observar la integridad de los pélets que a simple vista se ven como pélets con una buena calidad, es decir, el resultado que se obtuvo peletizando la cascarilla de arroz sin el uso de un aglomerante fueron exitosas.

#### **4.1.1. Evaluación de la calidad de los pélets**

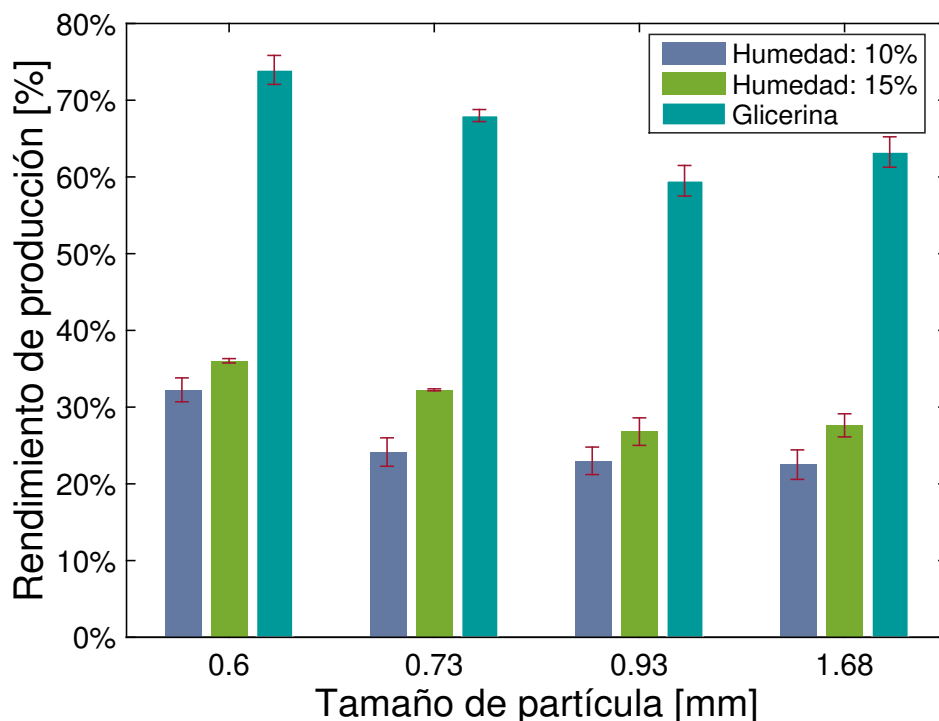
Una vez se produjeron los pélets, estos fueron sometidos a las diferentes pruebas de calidad descritas en la sección 3.2.3. A continuación se describen los resultados para cada una de las pruebas y se discute sobre ellos.



**Figura 4-1.:** Imágenes de los pélets producidos para todas las mezclas

### Rendimiento

Los resultados para el rendimiento de producción se pueden ver en la Figura 4-2. La figura muestra que los rendimientos para cascarilla de arroz son bajos (<40 %) en todas las condiciones que se evaluaron, agregando únicamente agua. El efecto de la adición de glicerina en este parámetro es claro, los rendimientos aumentaron de forma considerable, superando en su mayoría el 60 %.



**Figura 4-2.:** Resultados en el rendimiento de producción

Los bajos rendimientos de las muestras sin glicerina se deben a la dificultad de flujo del material en los canales de la matriz. En las diferentes pruebas se notó que iniciando el proceso de peletización se daba la formación de pélets, pero a medida que procedía la prueba, se empezó a notar el taponamiento de algunos orificios de la matriz, impidiendo el flujo del material (a excepción de algunos agujeros) y haciendo que los rodillos de la peletizadora molieran el material en partículas muy finas.

Por otro lado, es claro que en lo que se muestra en la Figura 4-2 existe una tendencia tanto para tamaño de partícula, como para la cantidad de humedad y para la glicerina agregada. Según lo observado el rendimiento de producción de los pélets aumenta a medida que disminuye el tamaño de partícula y aumenta la humedad. Esto nos da una idea de cómo se está llevando a cabo el proceso de aglomeración en la peletizadora, siendo más eficien-

te en este caso para las partículas más pequeñas debido a la mayor área de contacto que se da en ellas y al aumento de humedad que potencia los mecanismos de aglomeración como la formación de puentes sólidos, ablandamiento de la lignina, desnaturalización de la proteína y gelatinización del almidón [24], [27], [29], [47].

En cuanto a lo que se observa en la literatura, Ishii y Foruichi [39] en su estudio, obtienen resultados opuestos en el rendimiento para la paja de arroz, es decir, tamaños de partícula mayores mejoran el rendimiento de producción, sin embargo, a mayores valores de humedad obtienen rendimiento más altos. Además, mencionan que para otros tipos de biomásas como los residuos de madera, las tendencias son diferentes. Finalmente, Jackson et al [40] analizaron el rendimiento de producción para miscanthus, pasto Varilla, paja de trigo y rastrojo de maíz respecto a la cantidad de humedad de la biomasa. Aquí se obtiene que para miscanthus, pasto varilla y paja de trigo los rendimientos de producción aumentan con la humedad, pero para Rastrojo de maíz no se ve una influencia importante de la humedad sobre este parámetro.

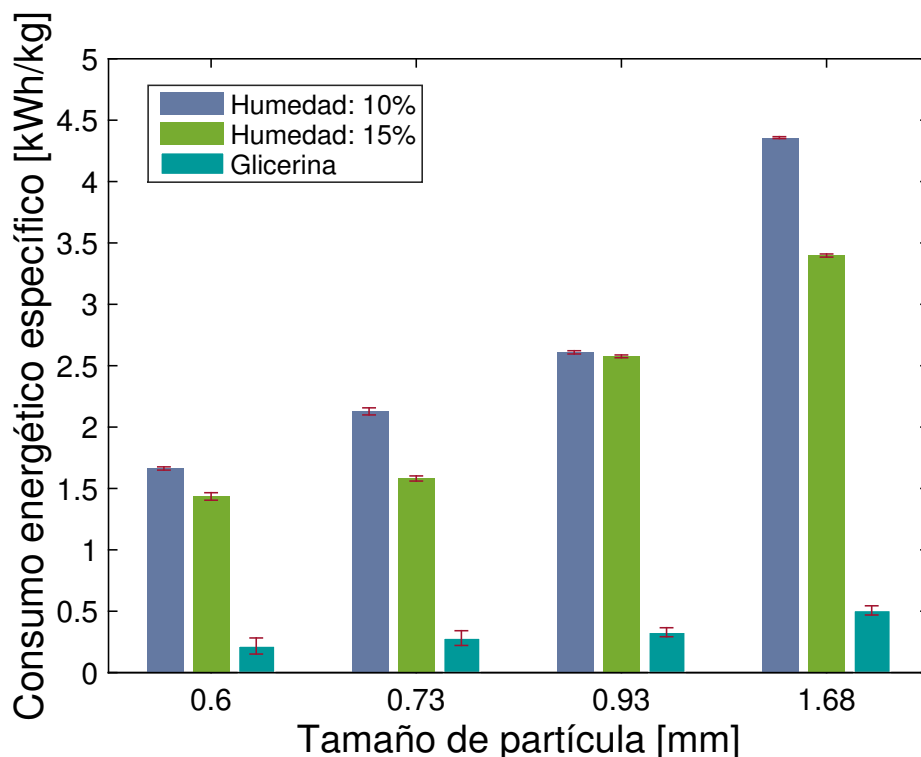
En cuanto al efecto de la adición de glicerina, éste es positivo en el rendimiento, aumentando de manera considerable la producción de pélets. Esto se da debido a que la glicerina actúa como un lubricante en el proceso, facilitando el flujo del material a través de los canales de la matriz e impidiendo el taponamiento anteriormente mencionado para las muestras sin glicerina. Este efecto lubricante por parte de la glicerina, en peletizadoras a escala piloto, es descrito por varios autores [93], [94], [97].

Se concluye que los resultados obtenidos para estos parámetros son similares a los representados en la literatura. Es muy claro que a las condiciones de peletización en las que no se da adición de glicerina, no son ideales para procesos industriales debido a los bajos rendimientos. Sin embargo, si bien la adición de glicerina genera una mayor producción de pélets, estos podrían salir con defectos en cuanto a su calidad, por lo que es importante complementar esta información con los resultados de la evaluación en la calidad de los pélets.

### Consumo energético

La Figura 4-3 muestra el consumo energético de cada una de las mezclas evaluadas. Aquí se puede ver que el consumo energético específico se ve afectado por el tamaño de partícula, por el contenido de humedad y por la adición de glicerina.

La tendencia muestra que a medida que el tamaño de partícula es más grande, el consumo energético también lo es. Esto se da debido a que la peletizadora realiza un mayor esfuerzo para hacer fluir partículas de mayor tamaño por los orificios de la matriz.



**Figura 4-3.:** Resultados para el consumo energético

Respecto al contenido de humedad, se observa que la tendencia es que el consumo energético específico disminuye al aumentar la humedad. Esto se explica por dos razones. La primera es que a mayor cantidad de agua, los procesos de aglomeración de las partículas se ven favorecidos, generando la producción de una mayor cantidad de pélets como se ve

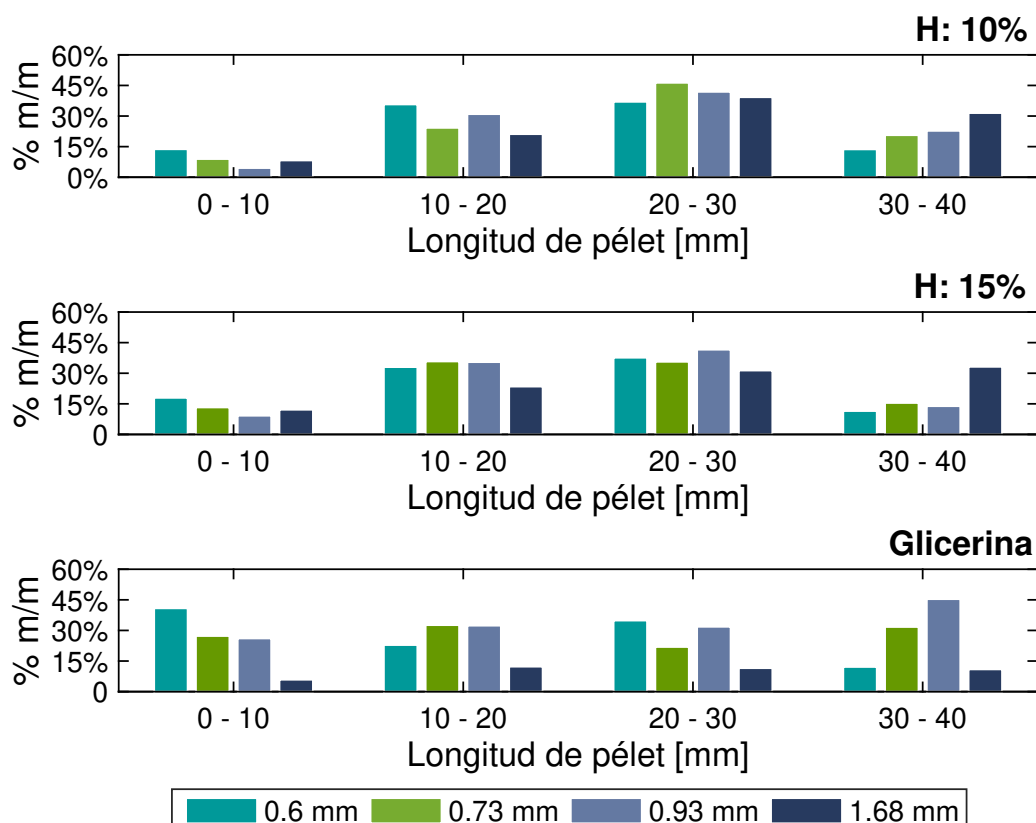
en la Figura 4-2. La segunda razón es que el agua también actúa como lubricante, disminuyendo el factor de fricción entre la matriz y el material, por lo que éste último puede fluir con mayor facilidad por los orificios de la matriz.

Finalmente, el efecto de la glicerina es claro. La adición de la glicerina genera una disminución del consumo energético específico, de aproximadamente el 80 % en promedio para todos los casos. La explicación se da por el efecto lubricante de la glicerina que hace que el material fluya con mucha mayor facilidad a través de la matriz. Este efecto se describe en varios trabajos, tanto para peletizadoras de una unidad, como peletizadoras industriales [94], [97], [98]. Lo anterior sumado a que los rendimientos son muy superiores (ver Figura 4-2), se puede decir que la glicerina beneficia mucho a la producción de pélets de cascarilla de arroz.

### **Distribución de tamaño de pélets**

La distribución de tamaño de los pélets se puede ver en la Figura 4-4. Aquí se puede observar que, comparando los resultados obtenidos para las dos humedades 10 % y 15 %, se ve que para el valor del 15 % se da una mayor producción de pélets en un rango de longitud de 0-10 mm. Además, para esta humedad se da una menor producción de pélets de longitudes superiores a los 30 mm. Si bien la humedad tiende a mejorar en general la producción de pélets, en grandes cantidades puede ser perjudicial para la calidad del pélet [24], [47]. Con respecto a la adición de glicerina se tiene que producen una mayor cantidad de pélets en el rango más pequeño para todos los tamaños de partícula y una menor cantidad de pélets con longitud mayor a 30 mm.

Adicionalmente, se puede observar que los pélets para la longitud más grande, el tamaño de partícula de 1.63 mm predomina en los dos casos de humedad, a excepción de la muestra con glicerina, en dónde se obtiene que el porcentaje de pélets en el rango de 30-40 mm es igual en todos los tamaños de partícula. También es importante notar que la longitud predominante en todos los casos siempre fue 20-30 mm, seguido del rango de 10-20 mm. Se puede concluir que 10-30 mm es el rango normal del proceso y operación



**Figura 4-4.:** Resultados para la distribución de longitud de los pélets

del equipo.

### Densidad de bulto

En la Figura 4-5 se puede observar que existe una tendencia para el tamaño de partícula en la cual a menor tamaño de partícula el valor de la densidad de bulto disminuye. Lo mismo se ve para la humedad, se nota que los valores de densidad de bulto, en general, son menores para una humedad del 10 %. Según la literatura revisada, la humedad puede tener o no un efecto significativo sobre la densidad de bulto de los pélets; esto dependerá de la biomasa, sus propiedades y su composición lignocelulósica, como lo muestra Jackson et al [40] en su estudio. Este efecto se dará por la expansión de los pélets a la salida de la matriz o un tiempo de retención dentro de la matriz muy pequeño. Para este estudio,



no se da ninguno de los dos casos debido a que las diferencias entre muestras no son grandes, tanto para humedad y para tamaño de partícula.

Respecto a la adición de la glicerina, la Figura 4-5 muestra que se presenta un efecto negativo en la densidad de bulto, a excepción del tamaño de partícula más grande. En la literatura se encuentra que no existe un consenso respecto al efecto de la glicerina sobre la densidad de bulto. Existen varios resultados en dónde la adición de glicerina favorece la densidad de bulto [94], [97], [98] y en otros dónde la afecta negativamente [99], [100].

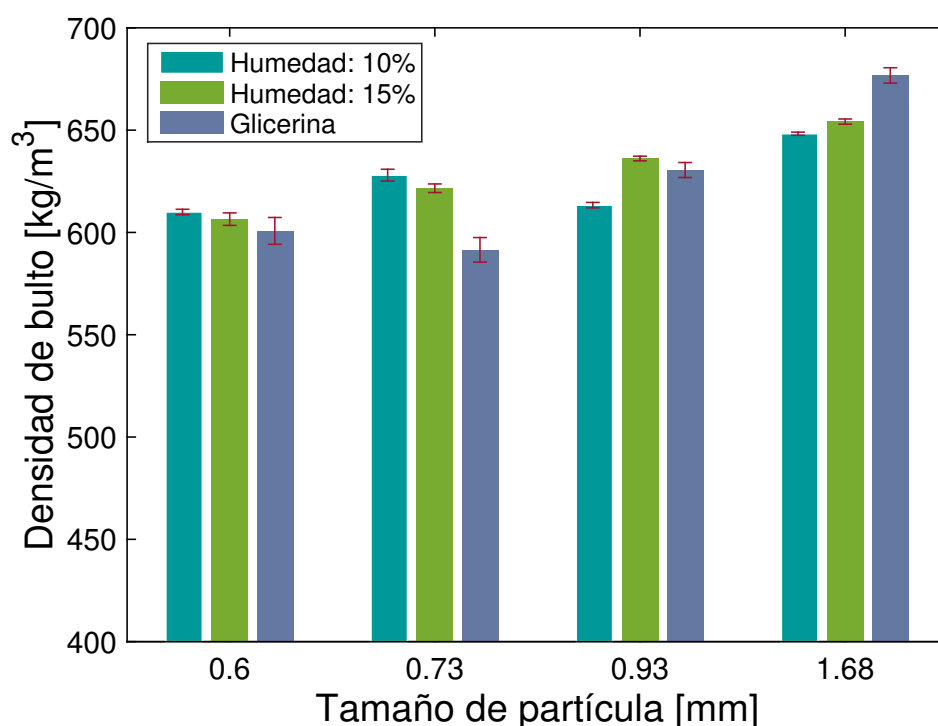


Figura 4-5.: Resultados para la densidad de bulto

### Resistencia al impacto o Durabilidad

En general, para todas las pruebas realizadas los pélets presentaron una buena resistencia al impacto o durabilidad. En la Figura 4-6 se puede observar como la resistencia al

impacto se ve afectada por el tamaño de partícula y la humedad de la biomasa cruda. Se ve que el efecto del tamaño de partícula es inverso con respecto a los dos porcentajes de humedad trabajados. Para el 10 % de humedad, la tendencia es que a medida que disminuye el tamaño de partícula, disminuye la resistencia al impacto; en cuanto al 15 % de humedad, los tamaños de partículas más grandes favorecen la resistencia al impacto. Por otro lado, respecto a la humedad, se puede ver que el efecto se hace más notorio para los dos tamaños de partícula extremos, es decir, 0.6 mm y 1.68 mm. Para 0.6 mm la humedad de 10 % favorece la resistencia al impacto y para 1.68 mm la humedad de 15 % es la más adecuada. Todo lo anterior habla sobre un efecto cruzado entre el tamaño de partícula y la humedad de la biomasa cruda.

Según lo mencionado por Kaliyan y Morey [47], a menor el tamaño de partícula y mayor contenido de humedad mayor durabilidad. Sin embargo, existe un límite para el contenido de humedad en el cuál la durabilidad del pélet empieza a disminuir debido a que el agua forma capas entre las partículas de la biomasa, y por su incompresibilidad, no permite su aglomeración. Por otro lado, los tamaños de partícula pequeños favorecen la durabilidad debido a que presentan mayor área de contacto entre partículas y porque absorben mayor humedad que las partículas grandes.

Lo anterior explica el por qué se da una tendencia cruzada entre los valores de durabilidad obtenidos cambiando el contenido de humedad y el tamaño de partícula. Adicionalmente, estudios muestran que la durabilidad con el tamaño de partícula también depende del tipo de biomasa que se esté trabajando. Existen algunos casos en los que el efecto del tamaño de partícula no es notorio [39], [40] y en otros en los que incluso la durabilidad disminuye con el mismo [94]. Esto también explica el por qué el efecto entre los tamaños intermedios (0.73 mm y 0.93 mm) no presentan un efecto notorio para un cambio en el contenido de humedad y el tamaño de partícula.

Por otro lado, la glicerina presenta un efecto negativo en la durabilidad del pélet en todos los casos. Además de esto, se ve que en las muestras con glicerina la durabilidad disminuye a medida que disminuye el tamaño de partícula. Esto es resultado de efecto

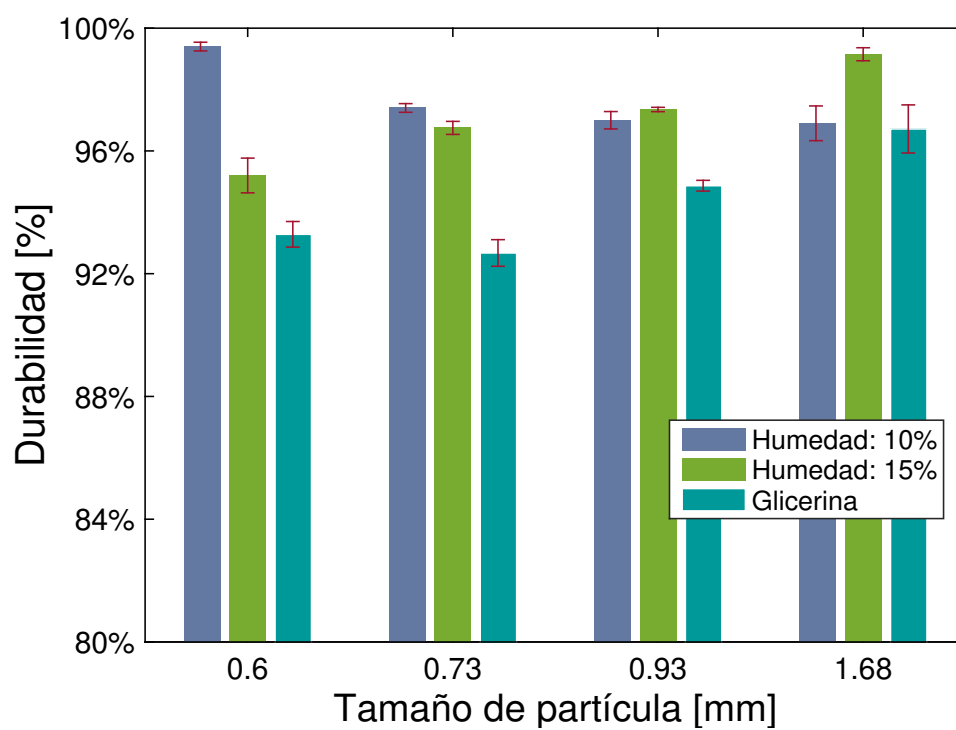
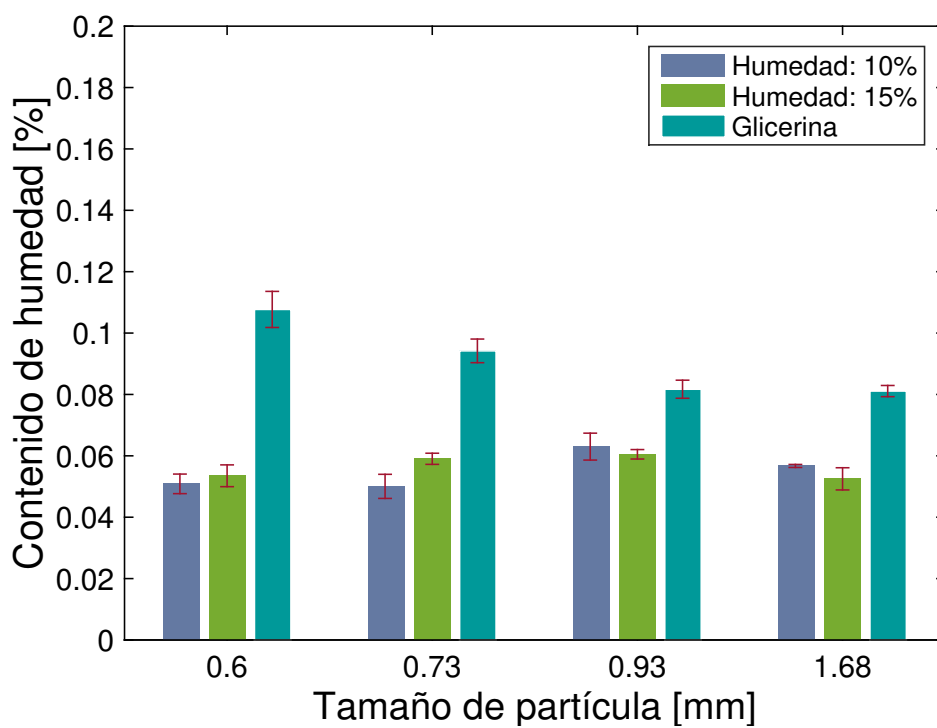


Figura 4-6.: Resultados para la durabilidad

lubricante de la glicerina, el cual hace que disminuya el factor de fricción entre partículas de biomasa, y entre la biomasa y la matriz, lo que lleva a una pérdida en la presión ejercida. Adicionalmente, la glicerina presenta grupos moleculares no polares que interfieren negativamente en la aglomeración de las partículas. La tendencia para el tamaño de partícula se puede explicar por la dificultad de los tamaños grandes para fluir por los orificios de la matriz, aumentando el factor de fricción y evitando afectar de manera considerable el valor de la durabilidad. En general lo presentado en la literatura [94], [97]–[100], habla de una disminución en la durabilidad con la adición de glicerina lo que concuerda con los resultados obtenidos.

### Contenido de humedad

El contenido de humedad de los pélets se tomó sin haber realizado un secado de los mismos. La Figura 4-7 muestra la humedad con la que quedaron los pélets después de cada



**Figura 4-7.:** Resultados para el contenido de humedad

prueba de peletización. Esta gráfica da una idea de la pérdida de humedad por evaporación durante el proceso debido a las altas temperaturas que se pueden alcanzar en la matriz. Teniendo esto en cuenta, los tamaños de partícula más grandes para los cuáles se presenta una mayor dificultad para fluir por los orificios de la matriz, generando mayores factores de fricción, mayores temperaturas en la matriz y causando taponamientos en los agujeros. Según lo que se ve en la Figura 4-7 los pélets producidos con los tamaños más grandes (0.93 y 1.63 mm) presentan un menor contenido de humedad debido a un mayor grado de aglomeración y por lo tanto a la formación de pélets que presentan dificultades para fluir por los canales de la matriz. Esto se puede verificar con los mayores valores de densidad, presentados para estos tamaños de partícula.

Por otro lado, debido a que la glicerina facilita el flujo de biomasa a través de la matriz, la temperatura no aumenta y la evaporación de agua no es tan notoria, obteniendo pélets

con humedades mayores, a excepción del tamaño de partícula más grande.

Finalmente, ésta pérdida de humedad también explica el porqué del bajo rendimiento en las muestras que no contienen glicerina, ya que como se ha mencionado en varias ocasiones, el contenido de agua es fundamental en los diferentes procesos de aglomeración que se dan en la peletización.

### **Análisis próximo, último y poder calorífico superior (PCS)**

Los resultados obtenidos para el análisis próximo, análisis último y PCS de los pélets se muestra en la Tabla 4-1. Para este caso, como se mencionó en la sección 2.1.2, tanto como los análisis últimos, próximo y PCS de la biomasa no se ven afectados en el proceso de peletización, sin la adición de glicerina, debido a que es un proceso netamente físico. Cuando se adiciona glicerina los valores del poder calorífico tienden a aumentar, sin embargo, debido a que no existe una diferencia significativa entre los valores del PCS entre la biomasa y la glicerina usada para este trabajo, este valor no cambia en gran magnitud. Finalmente, se ve una pequeña disminución del contenido de ceniza para tamaños de partículas más pequeños, por la pérdida de componentes pesado en la molienda; y para una adición de glicerina.

**Tabla 4-1.: Resultados de Análisis Último, Próximo y poder calorífico para las mezclas peletizadas**

Muestra	Análisis último <sup>bs</sup>					Análisis próximo <sup>bs</sup>				Poder calorífico [kJ/kg]
	%C	%H	%N	%S	%O	Cenizas	M. Volátil	C. Fijo	Azufre	
CAR1210	36,35 %	4,44 %	0,42 %	0,13 %	30,73 %	20,56 %	64,76 %	14,69 %	0,13 %	14627,3
CAR2010	36,47 %	4,58 %	0,48 %	0,12 %	32,09 %	19,76 %	64,33 %	14,65 %	0,12 %	14727,7
CAR3010	36,75 %	4,23 %	0,41 %	0,12 %	32,57 %	19,05 %	65,06 %	15,90 %	0,12 %	14465,4
CAP3010	36,64 %	4,41 %	0,45 %	0,12 %	33,40 %	18,20 %	66,50 %	15,30 %	0,12 %	14593,8
CAR1215	36,19 %	4,50 %	0,63 %	0,15 %	29,93 %	20,95 %	64,40 %	14,65 %	0,15 %	14547,8
CAR2015	36,29 %	4,70 %	0,37 %	0,12 %	30,73 %	20,16 %	65,27 %	14,56 %	0,12 %	14505,9
CAR3015	36,75 %	4,23 %	0,41 %	0,11 %	29,88 %	19,21 %	65,33 %	15,46 %	0,11 %	14336
CAP3015	37,04 %	4,57 %	0,38 %	0,12 %	30,92 %	18,99 %	65,74 %	15,27 %	0,12 %	14610,5
CAR12G	35,69 %	4,57 %	0,55 %	0,12 %	34,51 %	19,61 %	-	-	-	14047,1
CAR20G	35,69 %	4,57 %	0,55 %	0,12 %	33,66 %	18,26 %	-	-	-	14777,4
CAR30G	35,69 %	4,57 %	0,55 %	0,12 %	31,39 %	17,24 %	-	-	-	15017,7

#### **4.1.2. Comparación de la calidad de pélets con los estándares internacionales**

A continuación se hace una comparación de los resultados obtenidos para las mezclas descritas, respecto a los valores exigidos para cada parámetro en los diferentes estándares internacionales mencionados en la sección 2.1.5. En la Tabla **A-1** se muestran los resultados obtenidos, en dónde se puede observar que en la norma en la cual se cumplen más criterios es para la norma Fpr EN 14961-6, que es la norma establecida para biomasa herbácea según la clasificación hecha en EN 14961-1. Esto se debe a que la norma está hecha basada en información sobre las características de pélets de biomasa de tipo herbáceo, contrario a las restantes que están hechas para evaluar la calidad de pélets fabricados a partir de biomasa maderera; las cuales poseen mejores propiedades para la peletización y para su uso en procesos térmicos.

Por lo dicho anteriormente, tomando como comparación la norma Fpr EN 14961-6, se tiene que de los parámetros evaluados, el único que ninguna muestra cumple es el contenido de cenizas. Este contenido de cenizas viene dado por el material crudo, en este caso la cascarilla de arroz y por lo tanto con una peletización sin ningún tipo de aglomerante este será muy similar al material de partida. En este caso el valor en el contenido de ceniza que se tiene es alrededor del 19 %, siendo bastante alto comparado con el valor exigido por la norma, que es de un máximo de 5 %. La solución a este problema puede darse con la remoción de ceniza con métodos alternos como el lavado con HCl, pero esto podría afectar a la biomasa en su desempeño en el proceso de peletización.

Se puede concluir entonces que los pélets de cascarilla de arroz no cumplen con normas para biomasa maderera en los parámetros como contenido de ceniza, poder calorífico, % N y % S. Además normas específicas para biomasa de tipo herbácea aún no cumple con el contenido de ceniza, por lo que son necesarios más estudios para seguir con este desarrollo.

### 4.1.3. Selección de las mejores condiciones de peletización

La selección de las mejores condiciones de peletización para la producción de los pélets que serán evaluados en el proceso de gasificación, se hace a partir de una ponderación por puntos, teniendo en cuenta los parámetros más importantes. La Tabla 4-2 muestra la ponderación con las calificaciones dadas para cada parámetro evaluado. Los resultados muestran a la muestra CAP3015 como la muestra que presenta un valor ponderado más alto. En general esta muestra presenta valores de calidad y de producción que están por encima de otras muestras evaluadas, por lo que se elige como la muestra a peletizar para evaluar el proceso de gasificación.

Es importante resaltar, que si bien la glicerina presentaba un efecto muy positivo en la producción de los pélets, la calidad de los mismos se veía muy afectada. De esta manera, la tabla de ponderación muestra un análisis global respecto a estos efectos y claramente la calidad tiene un peso muy grande para hacer que la producción de pélets con la adición de glicerina, sea la adecuada para evaluar en el proceso de gasificación.

**Tabla 4-2.:** Tabla de ponderación para la selección de las mejores condiciones de peletización

	D	L	DB	ID	%H	% Cz	PCS	% N	% S	R	CEE	MyC	Valor ponderado
CAR1210	10	9	10	10	10	0	10	10	10	4,4	1,3	4	6,68
CAR2010	10	9,5	10	0	10	0	10	10	10	3,3	1	6	5,54
CAR3010	10	10	10	0	10	0	10	10	10	3,1	0,8	8	5,76
CAP3010	10	9,6	10	0	10	0	10	10	10	3	0,5	10	5,92
CAR1215	10	8,6	10	0	10	0	10	10	10	4,9	1,5	4	5,56
CAR2015	10	9,1	10	0	10	0	10	10	10	4,4	1,4	6	5,73
CAR3015	10	9,5	10	0	10	0	10	10	10	3,6	0,8	8	5,81
CAP3015	10	9,2	10	10	10	0	10	10	10	3,7	0,6	10	7,23
CAR12G	10	5,6	10	0	10	0	10	10	10	10	10	4	7,21
CAR20G	10	6,8	0	0	10	0	10	10	10	9,2	7,7	6	5,92
CAR30G	10	5,6	10	0	10	0	0	10	10	8	6,6	8	6,08
CAP30G	10	8,1	10	0	10	0	0	10	10	8,6	4,3	10	6,27

#### 4.1.4. Análisis general

Los resultados en general, demuestran una interacción interesante entre los tres parámetros: tamaño de partícula, contenido de humedad y adición de glicerina. En cuanto a los aspectos energéticos de la producción de pelets, la glicerina tiene un gran efecto positivo en el proceso de peletización, aumentando los rendimientos de producción y disminuyendo en un 80 % el consumo energético específico. Adicionalmente, el tamaño de partícula juega un papel importante en este punto, ya que mayores tamaños de partículas presentan consumos de energía mayores; sin embargo, se tendría que analizar el consumo energético para la molienda del material hasta el tamaño de partícula seleccionado para encontrar un punto adecuado. Finalmente, el efecto que presenta el contenido de humedad en la producción de los pélets es el esperado según la literatura [22], [24], [26]–[29], [47].

Es claro que la adición de glicerina beneficia a las características del proceso de producción de pélets, sin embargo, la mayoría de los parámetros de calidad se ven afectados. En lo encontrado en este trabajo, la adición de glicerina afecta negativamente parámetros de calidad como la durabilidad y la densidad de bulto, produce pélets de tamaños pequeños y aumenta el contenido de humedad; aunque para algunos parámetros este efecto no es tan considerable, en general la glicerina no es conveniente para la calidad del pélet. Por lo tanto, es necesario buscar un punto ideal para favorecer el proceso de producción sin afectar la calidad del pélet, es decir, realizar un proceso de optimización para el contenido de glicerina.

Respecto al tamaño de partícula, se ve que los tamaños grandes son los mejores para la calidad del pélets de cascarilla de arroz, ya que la mayoría de las propiedades de los pélets se ven beneficiadas. Esto es bueno pensando en un proceso industrial, ya que evitaría todos los costos relacionados con la molienda del material crudo.

El efecto del contenido de humedad no es claro, varía mucho respecto al parámetro que se esté evaluando y al tamaño de partícula usado. Esto demuestra una gran interacción



entre el tamaño de partícula y el contenido de humedad por lo que un estudio de optimización para estos dos parámetros es muy importante pensando en una implementación industrial de la cascarilla de arroz.

## **4.2. Gasificación de cascarilla de arroz**

En este ítem se presentan los resultados obtenidos en la gasificación de cascarilla de arroz, comparando cada uno de los parámetros descritos en la metodología para el material en su estado natural y el material peletizado. Inicialmente se describe los resultados de la evaluación de la velocidad mínima de fluidización y determinaciones de condiciones mínimas para garantizar lecho fluidizado.

### **4.2.1. Estudio fluido-dinámico**

Se realizó el estudio de fluidización para los dos materiales con el objetivo de llevar el proceso a las mejores condiciones.

#### **Fluidización con cascarilla de arroz cruda**

En primer lugar se evaluaron las condiciones de fluidización para los tamaños de partícula con los que se podía trabajar para la prueba de la biomasa cruda. Para esto se tomaron los mismos tamaños de partículas que se trabajaron para peletización. Las propiedades de los materiales que se usaron para el estudio se ilustran en la Tabla 4-3. Cabe resaltar, que el tamaño más pequeño tenía una diferencia muy grande en densidad con respecto a la sílice lo que hacía que a velocidades bajas (14 cm/s) se separe de forma muy rápida, impidiendo su fluidización; esto se puede observar en la Figura 4-8a. Finalmente, debido a lo que se encontró en el estado del arte, se decide usar un porcentaje de 10 % de biomasa en un lecho de sílice para la realización de cada una de las pruebas.

Es importante tener en cuenta que debido que no se tiene a disposición un montaje experimental para medir con precisión el grado de segregación en cada uno de los experimen-

**Tabla 4-3.:** Materiales para pruebas de fluidización

Propiedad	Material			
	Arena sílice	Cascarilla de arroz		
Tamaño de partícula [mm]	0,73	0,73	0,93	1,63
Densidad de bulbo [kg/m <sup>3</sup> ]	1400	239	156	120
Densidad de partícula [kg/m <sup>3</sup> ]	2600	-	-	-

tos, simplemente se tuvo en cuenta como es el mezclado, a simple vista, después de 10 min de fluidización. Se espera que este sistema binario se segregue debido a la diferencia entre densidades, donde la cascarilla de arroz actúa como “flotsam” y la arena sílice como “jetsam”.

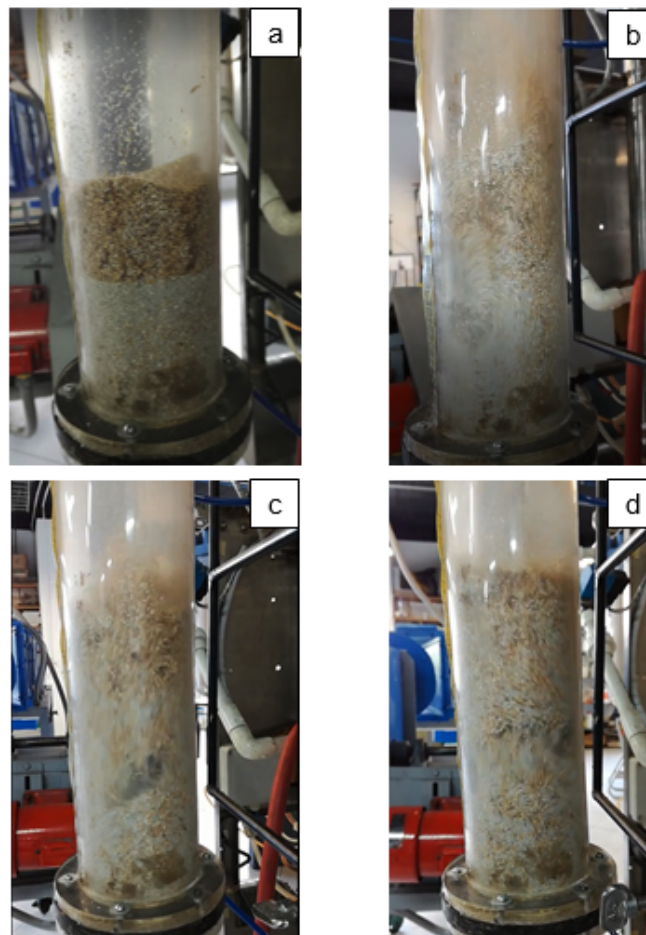
En la Figura 4-8 se pueden apreciar imágenes de las diferentes mezclas en fluidización pasados los 10 min. Aquí se puede observar, que a primera vista, existe un mayor porcentaje de separación de los materiales en el tamaño 0.73 mm (Figura 4-8b) y que a medida que aumenta el tamaño de partícula de la cascarilla de arroz, la separación es menos evidente (Figura 4-8c y Figura 4-8d). En este sentido se puede ver que el tamaño de partícula 1.63 mm presenta una menor separación, sin embargo, para este tamaño se observó la aparición de flujo pistón durante la fluidización.

Otro análisis importante es el de las curvas de fluidización obtenidas para cada material. En la Figura 4-9 se presentan las curvas de fluidización obtenidas para cada muestra. Aquí se observa que para los tamaños de 0.73 mm y 0.93 mm la curva de fluidización es normal, pero para el tamaño 1.63 mm se aprecia que después de entrar en fluidización la presión no es constante y entra en punto de máxima y mínima presión. Esto se debe a la formación de flujo pistón observado en las pruebas y mencionado anteriormente.

Los resultados obtenidos para la velocidad mínima de fluidización de cada muestra, se pueden apreciar en la Tabla 4-4. Aquí se puede notar que la velocidad mínima de fluidiza-

ción aumenta con el tamaño de partícula de la biomasa, y los valores cambian de manera considerable. Esto ya es conocido en la literatura, dónde Gerdarlt [66] reporta que la velocidad mínima de fluidización aumenta linealmente con el tamaño de partícula; en este punto, partículas más grandes presentan un peso y área mayores, lo que incrementa la fuerza de arrastre haciendo que se necesite mayor flujo de gas [101].

**Figura 4-8.:** Pruebas de fluidización para diferentes tamaños de biomasa. a) 0.6 mm, b) 0.73 mm, c) 0.93 mm, d) 1.6 mm

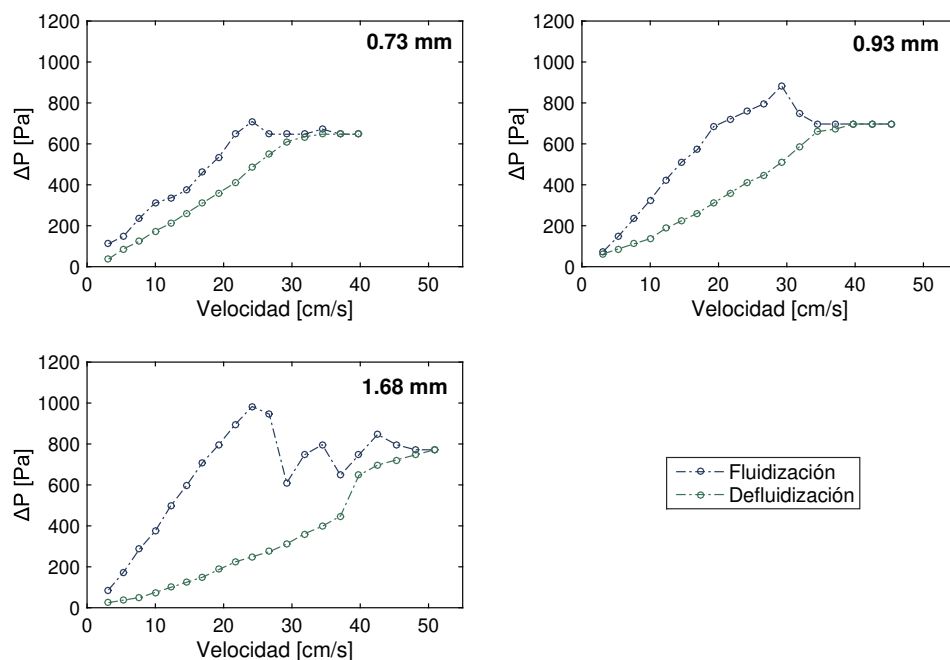


Teniendo en cuenta los resultados obtenidos anteriormente, resultados obtenidos para la velocidad mínima de fluidización de cada muestra se pueden apreciar en la Tabla 4-4. Aquí se puede notar que la velocidad mínima de fluidización aumenta con el tamaño de

partícula de la biomasa, y los valores cambian de manera considerable. Esto ya es conocido en la literatura, dónde Gerdarlt [66] reporta que la velocidad mínima de fluidización aumenta linealmente con el tamaño de partícula; en este punto, partículas más grandes presentan un peso y área mayores lo que incrementa la fuerza de arrastre haciendo que se necesite mayor flujo de gas [101]. Según la Tabla 4-4, se define que el tamaño de partícula a usar en las pruebas es el de 0.93 mm (malla P12/R20).

**Tabla 4-4.:** Velocidad mínima de fluidización para cada mezcla

Material	Malla	Tamaño de partícula [mm]	Velocidad mínima de fluidización [cm/s]
Arena sílice	P20/R30	0,73	13
Cascarilla de arroz	P20/R30	1,63	23,8
	P12/R20	0,93	37,6
	P8/R12	0,73	40,3

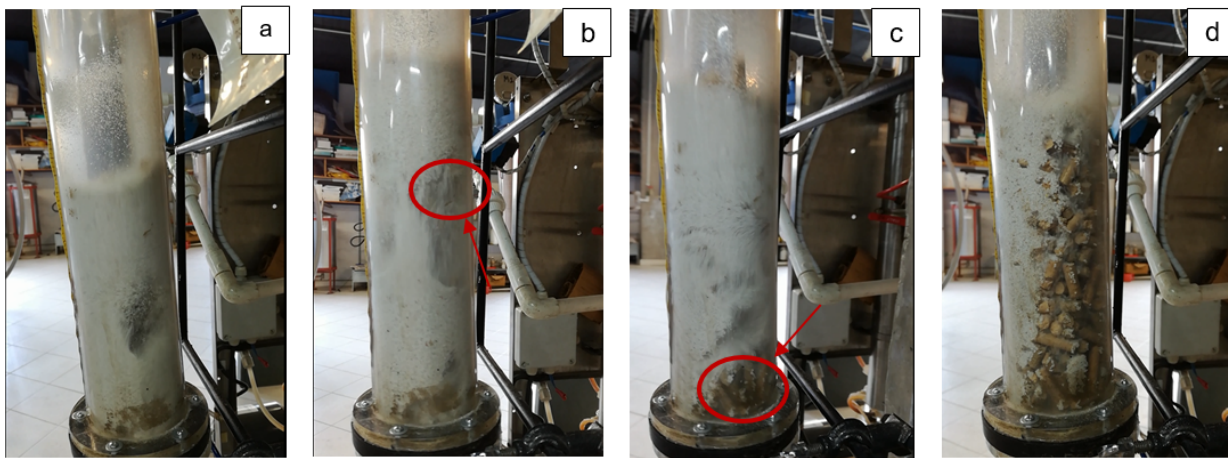


**Figura 4-9.:** Curvas de fluidización para los diferentes tamaños de partícula

### Fluidización para los pélets de cascarilla de arroz

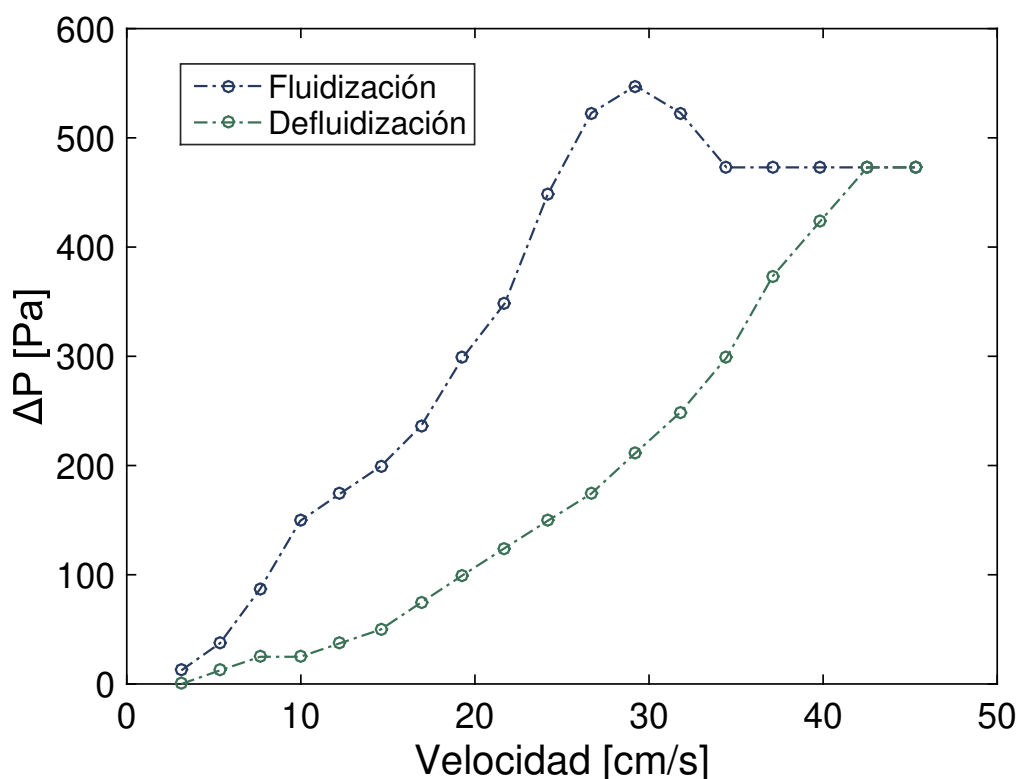
En el caso de los pélets se decidió realizar pruebas de fluidización cambiando el porcentaje másico de los pélets en el lecho. Los pélets usados, son los escogidos para el proceso de gasificación CAP3010. Los porcentajes que se usaron son de 5 %, 10 %, 15 % y 20 %. En cuanto el comportamiento de este sistema binario, éste cambia respecto al anterior debido a que los pélets de biomasa ahora actúan como “jetsam” y la arena sílice como “flotsam”, es decir, se espera que la separación sea de forma en que los pélets se vayan al fondo y la arena sílice suba.

Para estas pruebas únicamente se analizó el grado de segregación después de 10 min de fluidización y se realiza la curva de fluidización para el porcentaje seleccionado. En la Figura 4-10 se presentan imágenes de las mezclas en fluidización, en dónde se cambia el porcentaje de los pélets en el lecho de arena sílice. Aquí se puede ver que para el porcentaje de 20 % (Figura 4-10d), la cantidad de pélets es tan grande, y debido a que la velocidad terminal de una partícula tan grande es alta, la mezcla se comporta como un lecho fijo. En cuanto al 15 % (Figura 4-10c), el comportamiento de la mezcla es que, si bien no hay una segregación total, los pélets empiezan a descender lentamente como se ilustra en la parte inferior de la figura e indicada con un círculo rojo.



**Figura 4-10.:** Fluidización de pélets de cascarilla de arroz en un lecho de arena sílice. a) 5 %, b) 10 %, c), 15 %, d) 20 %

Para el 5 % y 10 % se tiene un buen comportamiento. En este caso no se ve que los pélets descendan, simplemente se reparten alrededor del lecho. Debido a que no se calcula con exactitud el grado de segregación no se puede determinar cuál es mejor. Por lo tanto, debido a que para la biomasa cruda se eligió un porcentaje del 10 % se toma éste valor como el elegido para realizar las pruebas de fluidización con los pélets.



**Figura 4-11.:** Curva de fluidización para 10 % en masa de pélets de cascarilla de arroz en un lecho de sílice

En la Figura 4-11 se aprecia la curva de fluidización correspondiente a la mezcla elegida para las pruebas de fluidización. Aquí se puede apreciar que la curva de defluidización se separa de la curva de la fluidización; esto es un indicativo de que se presentó segregación en el lecho y esto es razonable debido a que a velocidades bajas la tasa de mezclado disminuye por lo tanto los pélets empiezan a descender. La expansión que se aprecia para

este caso, se debe a la dificultad que causan los pélets a las partículas de arena para fluir. Los pélets en general cambian en tamaño, densidad y geometría, lo que causa que se de una caída de presión menor en el lecho de pélets y arena.

Finalmente, de la Figura 4-11 se obtiene que la velocidad mínima de fluidización para esta mezcla es de 26,2 cm/s.

#### 4.2.2. Pruebas de gasificación

Las pruebas tuvieron una duración de una hora en dónde se llevó un seguimiento de las variables de operación del reactor (temperatura de lecho y gases, caída de presión, flujo de entrada) y de la concentración del gas generado. Cada una de las pruebas se realizó por triplicado dando un total de 6 pruebas de gasificación. En la Tabla 4-5 se ilustran las condiciones del proceso a las que se llevaron a cabo las pruebas de gasificación tanto para la biomasa cruda como para la biomasa peletizada. Además, en la Tabla 4-6 se describen las propiedades fisicoquímicas de cada una de las materias primas utilizadas en las pruebas de gasificación.

Tal como se observa en la Tabla 4-6, las composiciones del análisis próximo y últimos tanto de la cascarilla desagregada y del pélet presenta ligeras modificaciones provocadas por el proceso de peletización con excepción de la densidad de bulto la cual se incrementa en más de cuatro veces, cuando la biomasa se peletiza. Las otras propiedades varían un

**Tabla 4-5.:** Condiciones del proceso para las pruebas de gasificación

Variable	Unidad	Biomasa cruda	Biomasa peletizada
Flujo de sólidos	kg/h	1500	1600
Temperatura	°C	850	850
Presión	atm	1	1
Flujo de aire	L/min	36	43
Relación de equivalencia	-	0,3	0,3

**Tabla 4-6.:** Propiedades fisicoquímicas de los materiales

Propiedad	Unidad	Cascarilla de arroz	
		Crudo	Pélets
Densidad de bulto	kg/m <sup>3</sup>	158	654
Poder calorífico	kJ/kg	14089	14548
C	% p/p	33,87	36,19
H	% p/p	4,57	4,5
N	% p/p	0,84	0,63
S	% p/p	0,12	0,15
O	% p/p	35,78	29,93
Humedad	% p/p	6,92	6,05
Ceniza	% p/p	17,9	20,95
Material Volátil	% p/p	55,85	64,4
Carbono fijo	% p/p	19,33	14,65

poco menos del 3 % como el valor del poder calorífico y menos del 25 % para el análisis último y próximo. Se aprecia una afectación del proceso de la peletización, puesto que se incrementa el porcentaje de cenizas, quizás, debido a la impurezas que existen en la peletizadoras, la cuales terminan agregándose al pélet, aumentando la participación de cenizas y disminuyendo los otros componentes como material volátil y carbono fijo.

#### 4.2.3. Gasificación de cascarilla de arroz y pélets de cascarilla de arroz

El seguimiento de la temperatura y composición de gas se puede observar en la Figura 4-12a y Figura 4-12b para la cascarilla de arroz y en la Figura 4-12c y Figura 4-12d para los pélets de cascarilla de arroz. Los resultados muestran una composición similar a lo encontrado en la literatura para gasificación de cascarilla de arroz en lecho fluidizado usando aire como agente gasificante [13], [74], [75], [83], [84].

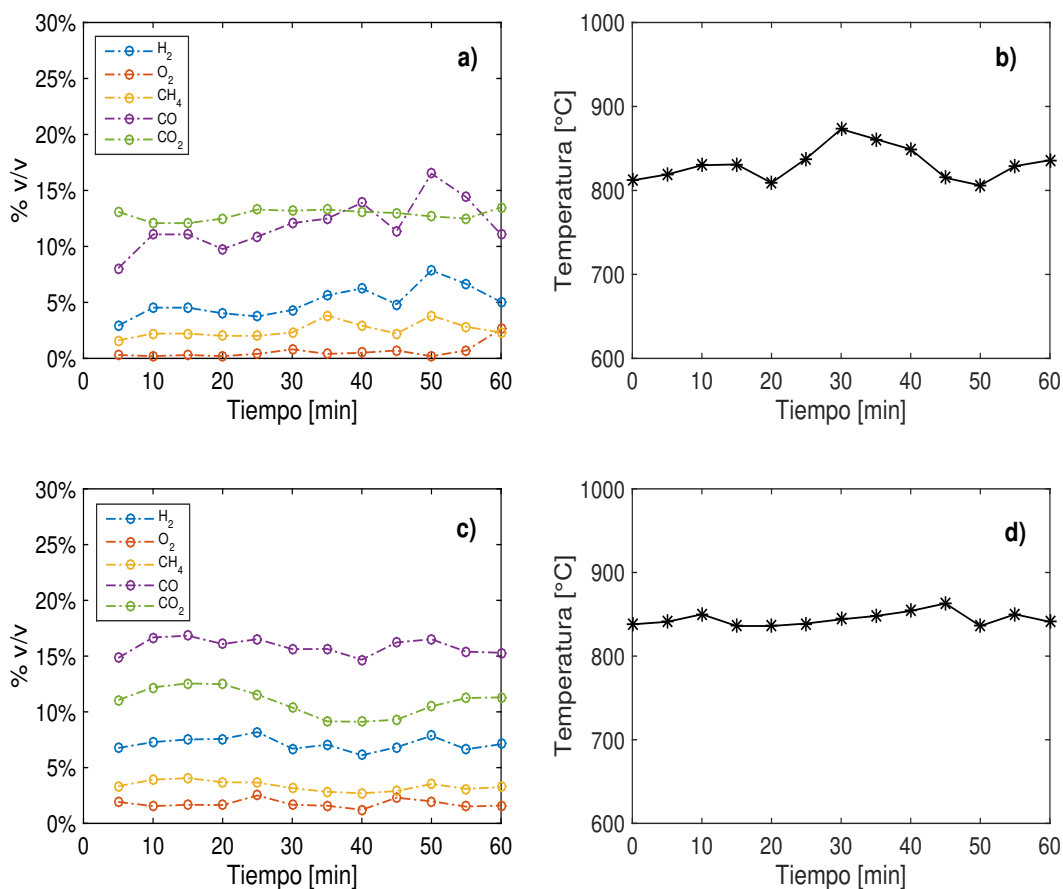
En general, el proceso de gasificación para pélets fue más controlado y sin problemas de alimentación del material. En algunos casos, se presentó presurización del reactor debi-



do a la rápida volatilización de partículas de biomasa desagregada en la freeboard y a la no uniformidad en la alimentación de las mismas. Esto para los pélets no sucedió ya que como se mencionó anteriormente, las tasas menores de consumo permitían que estas partículas cayeran al lecho sin estar completamente desvolatilizadas.

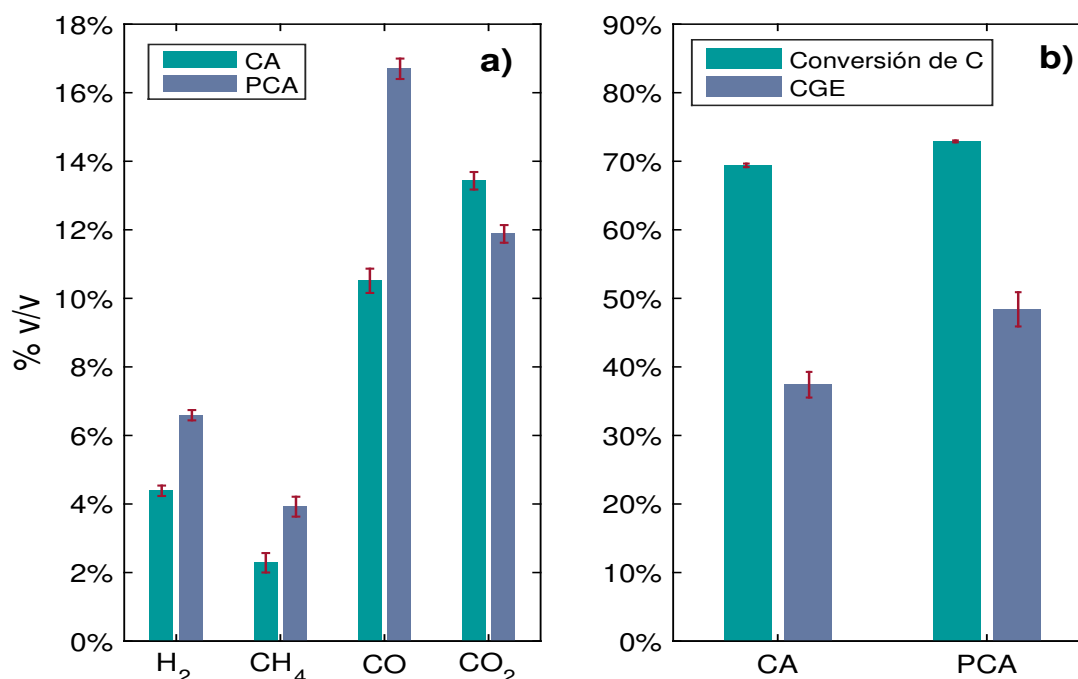
Adicionalmente, se pudo observar que la temperatura del lecho es más estable durante la gasificación de los pélets que cuando se llevó a cabo el proceso con la biomasa desagregada (ver Figura 4-12b y Figura 4-12d). Se observó que la evolución de la temperatura en el tiempo para cada una de las pruebas durante la gasificación de pélet varió tan solo un 3 %; entretanto, las variaciones en el proceso con biomasa desagregada fueron de 8 %.

En la Figura 4-13a se ilustran los resultados de composición promedio del gas producto para cada una de las pruebas. Aquí se puede observar un aumento en la composición de  $H_2$ ,  $CO$  y  $CH_4$  para las pruebas realizadas con pélets. Este resultado es similar a lo reportado por Yoon et al [75] para la gasificación de cascarilla de arroz y pélets de cascarilla de arroz en un reactor de lecho fijo, y lo reportado por Bronson et al [91] para la gasificación en lecho fluidizado de residuos madereros con diferentes tamaños de partículas, incluida biomasa peletizada. Estos cambios pueden explicarse por los cambios en los mecanismos de transferencia de masa y energía, y la reactividad del char resultante; que se presentan para una partícula de mayor tamaño y densidad, y geometría uniforme [102]. Incrementar el tamaño y la densidad de una partícula en el proceso de pirólisis genera un mayor rendimiento de carbonizado, según lo reportado por Elrich et al [103]. Esto lleva a pensar que en el proceso de gasificación, para una partícula de mayor densidad y tamaño como lo es el pélet, el tiempo de residencia de los vapores producidos en la desvolatilización es mayor debido a la resistencia de flujo, generando crackeo de sustancias que pasan a través de una capa exterior de carbonizado que se encuentra a alta temperatura [90], [104]; esto puede explicar el aumento de  $H_2$  y  $CH_4$ . Por otro lado, el efecto anteriormente mencionado puede explicar una producción mayor de  $CO$ , debido a que una mayor concentración de  $H_2$  hace que la reacción intercambio de agua-gas, mostrada en la Tabla 2-2, por principio de Le Chatelier tienda hacia los reactivos; esto también se puede comprobar



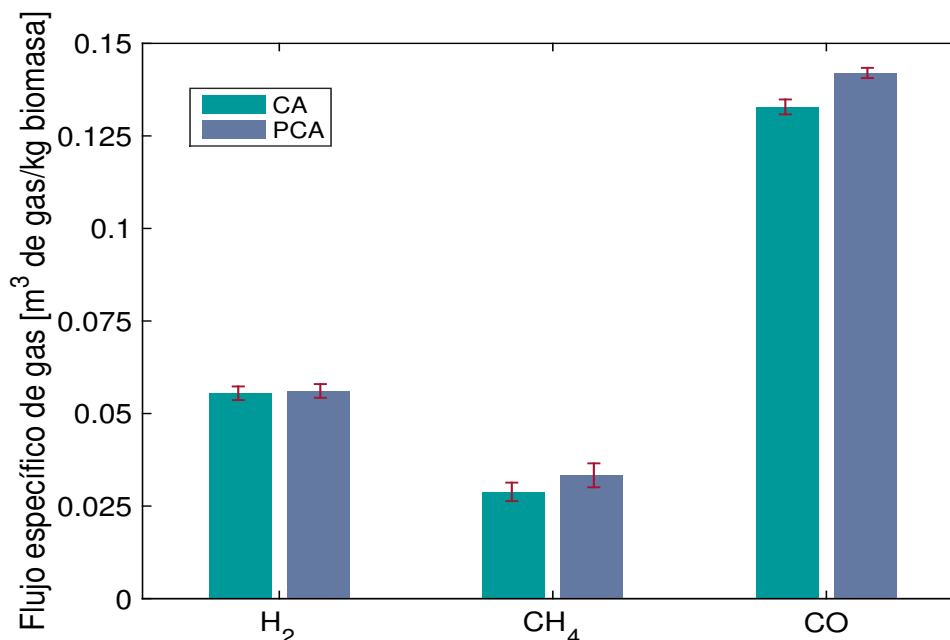
**Figura 4-12.:** Seguimiento de gases (a) y (b) y seguimiento de temperatura (b) y (d) para la gasificación de CA y de PCA respectivamente

por una mayor humedad en el gas producto, en dónde se tiene 0.08210 kg agua/kg gas para la cascarilla de arroz y 0.1085 kg agua/kg gas para los pélets de cascarilla de arroz. Estos datos anteriores fueron obtenidos por balance de especies en el reactor. Finalmente, una producción de gas con concentraciones de  $H_2$  y  $CO$ , es importante debido a que estos componentes contribuyen con el poder calorífico del gas; además, la relación  $H_2/CO$  es fundamental para el uso final del gas, ya sea para producción de energía mediante sistemas integrados o para la producción de combustibles líquidos.



**Figura 4-13.:** Resultados de pruebas de gasificación. a) Composición promedio del gas producto b) conversión de carbón y eficiencia de gas frío (CGE)

Por otro lado, los resultados en cuánto a la eficiencia de gas frío y a la conversión de carbón se pueden observar en la Figura 4-12b. Aquí se puede ver que tanto la conversión de carbón como la eficiencia de gas frío (CGE) son mayores para la gasificación con pélets. Sin embargo, por parte de la conversión de Carbón se esperaba que fuera mucho más superior para los pélets, debido a que estos son más resistentes a la abrasión del lecho y las pérdidas de carbonizado por elutriación no son tan significativas. Ammendola et al [104] en su trabajo, concluyen que estás partículas generadas por atrición del char, a las condiciones de gasificación, no son lo suficientemente reactivas y salen del reactor con una baja conversión de carbón; esto no sucede cuándo se está a condiciones de combustión. Finalmente, debido a que la alimentación se hizo por la parte superior del reactor (zona libre), la volatilización de las partículas más pequeñas se presenta en esa zona, lo que causa un arrastre de las partículas desvolatilizadas por fuera del reactor.



**Figura 4-14.:** Flujos de gas producto por masa de biomasa

Lo anterior hace que las partículas de biomasa presenten un menor tiempo de residencia dentro del reactor, impidiendo la conversión total de carbón [91]. Lo que pudo haber en este caso, en dónde no se observa una diferencia muy grande, se debe a que los pélets presentan tasas más lentas de consumo comparados con la biomasa desagregada [104], lo que genera que en procesos continuos éstos puedan ser retirados del reactor (por rebose) a tiempos menores a los de su consumo; esto porque se debe mantener una masa determinada para una buena fluidización del lecho.

La eficiencia de gas frío también se ve influenciada por lo mencionado anteriormente. La rápida salida del reactor por parte de partículas pequeñas de char, que son mayoría en el caso del material desagregado, impide su consumo y por lo tanto evita que se lleven a cabo reacciones como la reacción gas-agua o la reacción de oxidación parcial (ver Tabla 2-2) que producen CO y H<sub>2</sub>.

Otra ventaja de la peletización en el proceso de gasificación se puede ver en la 4-14, donde se puede apreciar el flujo volumétrico de  $H_2$ ,  $CH_4$  y  $CO$ , producido por cada kilogramo de biomasa. Es claro que existe una diferencia en la producción de  $CO$ , generada por un mayor tiempo de residencia de partículas debido a la inclusión de partículas con mayor densidad. Esto representa una ventaja en el proceso debido que el  $CO$  es fundamental cuando se habla del uso final del gas en la producción de energía térmica a partir de este.

Un segundo aspecto importante es la formación de aglomerados en el lecho debido a la fusión de cenizas. Como se explicó en el párrafo anterior, la temperatura del lecho para la biomasa desagregada fue muy inestable, esto genera la aparición de pequeñas zonas calientes con temperaturas superiores a la de la fusión de cenizas, generando aglomerados como los que se puede ver en la Figura 4-15. Por otro lado los pélets presentan un consumo más uniforme y por su alto contenido de ceniza la estructura del carbonizado es más resistente manteniendo su forma original y disminuyendo en tamaño como se muestran en la Figura 4-16. Además, debido a su tamaño se presentan perfiles de temperatura dentro de la partícula lo que impide la formación de aglomerados, evitando problemas como la desfluidización del lecho.

Un tercer aspecto a analizar es la producción de tar que no fue objeto de este trabajo; sin embargo, otros autores [75], [91] reportan una mejora en este aspecto. En general se tiene que los pélets generan una menor producción de tar, lo que implica una mejora importante dentro del proceso.

En este estudio la alimentación de biomasa se realizó por la parte superior, lo que generó el arrastre de las partículas desde la freeboard por una volatilización instantánea de las partículas pequeñas. Si la alimentación del reactor se realiza por el lecho, se podría evitar este problema, lo que hace muy importante realizar este estudio para asegurar una mejora del proceso en este aspecto para el uso de biomasa peletizada.



**Figura 4-15.:** Aglomeración de partículas de biomasa desagregada



**Figura 4-16.:** Consumo de pélets de biomasa

En conclusión, los cambios que genera el proceso de peletización en la biomasa, presenta una gran influencia en muchos aspectos del proceso de gasificación en lecho fluidizado. Esto se da por la forma y tamaño uniforme en los pélets que presentan una ventaja cuando se habla de los sistemas de alimentación, condiciones de fluidización y el consumo de las partículas. Adicionalmente, las ventajas de usar pélets de biomasa en un reactor de lecho fluidizado son la generación de un mejor gas de síntesis por una mayor relación  $H_2/CO$ , una mayor conversión de C y una mayor eficiencia de gas frío. Sin embargo, debido a que el proceso de peletización presenta un costo adicional en la cadena de producción del gas de síntesis, es necesario realizar un estudio de costos para analizar si las mejoras son viables económicamente.

## 5. Conclusiones y recomendaciones

### 5.1. Conclusiones

En este estudio se evaluó el efecto de la peletización de la cascarilla de arroz sobre el proceso de gasificación en un reactor de lecho fluidizado a escala piloto. En primer lugar se realizó un estudio de peletización para la obtención de los pélets de la mejor calidad según estándares europeos. Para esto, se analizó la producción de pélets cambiando diferentes parámetros del proceso que fueron: tamaño de partícula y humedad del material desagregado, y la adición de glicerina cruda en el proceso. Las conclusiones que se obtuvieron durante este estudio de peletización son las siguientes:

- La producción de pélets de calidad a partir de cascarilla de arroz, es posible usando una peletizadora de matriz plana, a las condiciones de tamaño de partícula, cantidad de humedad y adición glicerina evaluadas en este trabajo.
- El efecto de la cantidad de humedad no es claro para la calidad del pélet debido a que está muy ligado al tamaño de partícula usado, es decir, hay un efecto cruzado entre estos dos parámetros. Los resultados de este estudio muestran que para un tamaño de partícula de 0.6 mm el agua afecta negativamente la durabilidad y densidad de bulto; sin embargo, para un tamaño de partícula mayor (1.63 mm) la cantidad de agua favorece la durabilidad y la densidad de bulto del pélet. Adicionalmente, la cantidad de agua favorece al rendimiento de producción de los pélets y al consumo energético del proceso.
- El tamaño de partícula es fundamental para la producción de pélets de buena calidad. En este trabajo se obtuvo que a mayores tamaños de partícula se presentaron

pélets con mejor calidad en cuanto a durabilidad, densidad de bulto y cantidad de humedad; en la mayoría de los casos, valores suficientes, para cumplir con los estándares Fpr EN 14961-6. Por otro lado, se observó que con tamaños de partícula más grandes, características del proceso como el rendimiento en la producción de pélets y el consumo energético de la peletizadora se veían afectados negativamente; sin embargo, tamaños grandes significan menores costos de molienda para preparación del material, por lo que es importante realizar un estudio de optimización para encontrar un tamaño de partícula ideal en cuánto a costos de producción de pélets.

- La glicerina en la producción de pélets actúa como un aditivo ya que puede potenciar el poder calorífico de los pélets y mejora sustancialmente el rendimiento de producción y el consumo energético del proceso. Sin embargo, debido a sus características lubricantes, la glicerina afecta negativamente los parámetros de calidad del pélets, generando pélet con menor durabilidad, menor densidad de bulto y con un mayor contenido de humedad.
- Se determinó que la calidad de pélets producidos a partir de cascarilla de arroz no puede ser evaluada mediante normas europeas como la ONÖRM M7135, DIN 51731, SS 187120 y CTI-R04/05, ya que éstas presentan criterios imposibles de alcanzar usando biomasa residuales de procesos agroindustriales, como materia prima.

Adicionalmente, las conclusiones en cuánto a la fluidización tanto para partículas de biomasa desagregada, como para pélets, son las siguientes:

- Tamaños de partícula de cascarilla de arroz de 0.6 mm o menores no pueden ser fluidizados con arena, ya que se genera segregación total a velocidades bajas.
- La velocidad mínima de fluidización de un sistema arena-cascarilla de arroz aumenta cuándo aumenta el tamaño de partícula de la biomasa.
- Si bien no se cuantificó el valor de segregación para cada uno de los tamaños de partícula, se puede observar que con los tamaños de partícula más grandes usados en este estudio (0.93 mm y 1.63 mm) se observaron las mejores tasas de mezclado después de 10 min de fluidización.



- La cantidad de pélets dentro de un lecho de sílice, con las características usadas en este estudio, varía entre 5 % y 10 % en masa. A mayores porcentajes a estos, se observó la ubicación de pélets en el fondo del lecho.

Finalmente, los resultados que se obtuvieron para el proceso de gasificación de cascarilla de arroz y pélets de cascarilla de arroz permiten concluir:

- La alimentación de cascarilla de arroz peletizada a un proceso de gasificación en lecho fluidizado, evita problemas de alimentación no uniforme y formación de aglomerados debido a la fusión de cenizas.
- La gasificación de biomasa en forma de pélets se lleva con un mayor control por un consumo más uniforme de las partículas, esto evita cambios bruscos de temperatura en el lecho, la formación de aglomerados y la producción de un gas con una composición más uniforme.
- Se observó que la gasificación de pélets, comparado con la biomasa desagregada, presenta una mejor conversión de carbón, una mayor eficiencia de gas frío y una mayor producción de  $CO$ ,  $H_2$  y  $CH_4$ .
- Si bien la peletización de la biomasa como pretratamiento del proceso de gasificación, conlleva a mejoras en el proceso, es necesario realizar un estudio de costos para ver la viabilidad económica de este.

## 5.2. Recomendaciones

La discusión sobre los resultados obtenidos en este trabajo deja algunos aspectos que merecen ser ampliados como complemento y profundización a la discusión planteada en este trabajo.

- Debido a que el porcentaje de cenizas en la cascarilla de arroz es muy alto, sería de gran interés estudiar el efecto que podría tener alguna técnica de remoción de ceniza sobre la calidad de pélets y proceso de peletización.

- Un estudio paramétrico sobre el tamaño de partícula y la cantidad de agua puede arrojar los valores óptimos de estos dos parámetros para la producción de pélets con la mejor calidad.
- Profundizar sobre el comportamiento fluidodinámico de biochar de cascarilla de arroz y pélets de cascarilla de arroz para conocer efectos de segregación que puedan afectar el desempeño del proceso de gasificación en lecho fluidizado.
- Estudiar sobre parámetros de calidad de pélets aplicados al proceso de gasificación; los actuales están enfocados en el proceso de combustión.

## **A. Anexo: Peletización**

**Tabla A-1.:** Comparación de los parámetros de cada muestra peletizada respecto a diferentes norma para calidad de pélets de biomasa

	D					L					DB					ID					%H					% Cz					PCS					% N					% S				
Norma	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
CAR1210	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	✓	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x	x	x	x	x	x	x	x	x	✓	x	x	-	x	✓	x	x	x	✓	✓
CAR2010	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	✓	✓	✓	x	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	x	x	x	x	x	x	x	x	x	✓	x	x	-	x	✓	x	x	x	✓	✓
CAR3010	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	✓	x	✓	x	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	x	x	x	x	x	x	x	x	x	✓	x	x	-	x	✓	x	x	x	✓	✓
CAP3010	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	✓	✓	✓	x	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	x	x	x	x	x	x	x	x	x	✓	x	x	-	x	✓	x	x	x	✓	✓
CAR1215	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	✓	x	✓	x	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	x	x	x	x	x	x	x	x	x	✓	x	x	-	x	✓	x	x	x	✓	✓
CAR2015	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	✓	✓	✓	x	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	x	x	x	x	x	x	x	x	x	✓	x	x	-	x	✓	x	x	x	✓	✓
CAR3015	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	✓	✓	✓	x	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	x	x	x	x	x	x	x	x	x	✓	x	x	-	x	✓	x	x	x	✓	✓
CAP3015	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x	x	x	x	x	x	x	x	x	✓	x	x	-	x	✓	x	x	x	✓	✓	
CAR12G	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	✓	x	✓	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	-	x	✓	x	x	x	✓	✓	
CAR20G	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	✓	x	x	✓	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	-	x	✓	x	x	x	✓	✓	
CAR30G	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	✓	✓	✓	x	x	x	x	x	x	✓	x	x	✓	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	-	x	✓	x	x	x	✓	✓	
CAP30G	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	✓	✓	✓	x	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	-	x	✓	x	x	x	✓	✓		

# Bibliografía

- [1] J. Fernández, “Energía de la Biomasa.”
- [2] P. Mckendry, “Energy production from biomass ( part 1 ): overview of biomass,” vol. 83, no. July 2001, pp. 37–46, 2002.
- [3] Á. J. C. Ferre, “La Biomasa Procedente De Cultivos Agrarios: Energía Renovable,” *Idesia*, pp. 5–6, 2010.
- [4] D. R. Tobergte and S. Curtis, *Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia*, vol. 53, no. 9. 2013.
- [5] J. Sierra Aguilar, “Alternativas de aprovechamiento de la cascarilla de arroz en Colombia,” pp. 1–94, 2009.
- [6] E. Natarajan, a Nordin, and a. . Rao, “Overview of combustion and gasification of rice husk in fluidized bed reactors,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 14, no. 5–6, pp. 533–546, 1998.
- [7] I. Obernberger and G. Thek, *The pellet handbook: The production and thermal utilisation of biomass pellets*. 2010.
- [8] M. Siedlecki, W. de Jong, and A. H. M. Verkooijen, “Fluidized bed gasification as a mature and reliable technology for the production of bio-syngas and applied in the production of liquid transportation fuels-a review,” *Energies*, vol. 4, no. 3, pp. 389–434, 2011.
- [9] P. Basu, *Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory*, vol. 53, no. 9. 2013.
- [10] S. Doring, *Power from pellets*. 2010.

- [11] G. Marrugo, C. F. Valdés, and F. Chejne, “Biochar Gasification: An Experimental Study on Colombian Agroindustrial Biomass Residues in a Fluidized Bed,” *Energy and Fuels*, vol. 31, no. 9, pp. 9408–9421, 2017.
- [12] F. Pinto, J. Gominho, R. N. André, D. Gonçalves, M. Miranda, F. Varela, D. Neves, J. Santos, A. Lourenço, and H. Pereira, “Effect of Rice Husk Torrefaction on Syngas Production and Quality,” *Energy & Fuels*, vol. 31, no. 5, pp. 5183–5192, 2017.
- [13] K. Manatura, J. H. Lu, K. T. Wu, and H. Te Hsu, “Exergy analysis on torrefied rice husk pellet in fluidized bed gasification,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 111, pp. 1016–1024, 2017.
- [14] Y. Zhao, D. Feng, Z. Zhang, S. Sun, H. Che, and J. Luan, “Experimental Study on Autothermal Cyclone Air Gasification of Biomass,” *J. Energy Resour. Technol.*, vol. 140, no. 4, p. 42001, 2017.
- [15] H. D. Apri Wiyono, Titi Puspita Sari Ika Pratiwi, Cindy Rianti Priadi, Adi Surjosatyo, “INVESTIGATION OF CO-GASIFICATION CHARACTERISTICS OF WOOD-COCONUT FIBERS PELLETS AND RICE HUSK MIXTURES IN A DOWNDRAFT FIXED BED GASIFIER,” *Int. J. Technol.*, vol. 7, no. x, pp. 1207–1216, 2017.
- [16] N. Bich, N. Van Lanh, B. H.-I. J. on, and undefined 2017, “The Composition of Syngas and Biochar Produced by Gasifier from Viet Nam Rice Husk,” *Insightsociety.Org*, vol. 7, no. 6, pp. 2258–2263, 2017.
- [17] I. Waste and N. E. Sources, “Estudio de planta piloto para peletización de residuos madereros y su utilización como combustible en hornos ladrilleros,” 2013.
- [18] S. Döring, *Power from pellets*. 2013.

- [19] W. Stelte, A. R. Sanadi, L. Shang, J. K. Holm, J. Ahrenfeldt, and U. B. Henriksen, "Recent developments in biomass pelletization - a review," *BioResources*, vol. 7, no. 3, pp. 4451–4490, 2012.
- [20] A. K. Biswas, W. Yang, and W. Blasiak, "Steam pretreatment of Salix to upgrade biomass fuel for wood pellet production," *Fuel Process. Technol.*, vol. 92, no. 9, pp. 1711–1717, 2011.
- [21] A. Garcia-Maraver, V. Popov, and M. Zamorano, "A review of European standards for pellet quality," *Renew. Energy*, vol. 36, no. 12, pp. 3537–3540, 2011.
- [22] A. Garcia-Maraver and J. A. Pérez-Jiménez, "Biomass Pelletization: Standards and Production." p. 194, 2015.
- [23] A. Garcia-Maraver, "Optimization of the pelletization process of agricultural wastes originating from olive farms for their application in domestic boilers," 2013.
- [24] J. Tumuluru, C. Wright, K. Kenny, and R. Hess, "A Review on Biomass Densification: Technologies for Energy Application," *Statew. Agric. L. Use Baseline 2015*, no. August, pp. 1–59, 2010.
- [25] P. Lehtikangas, "Storage effects on pelletised sawdust, logging residues and bark," *Biomass and Bioenergy*, vol. 19, no. 5, pp. 287–293, Nov. 2000.
- [26] I. N. Manickam, D. Ravindran, and P. Subramanian, "Biomass densification methods and mechanism," *Cogener. Distrib. Gener. J.*, vol. 21, no. 4, pp. 33–45, 2006.
- [27] S. Mani, L. G. Tabil, and S. Sokhansanj, "An overview of compaction of biomass grinds," *Powder Handl. Process.*, vol. 15, no. March/April 2003, p. 10, 2016.

- [28] M. Shaw, “Feedstock and Process Variables Influencing Biomass  
Densification,” 2008.
- [29] J. R. H. and K. L. K. Shankar Tumuluru, Christopher T. Wright, “A review  
of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for  
bioenergy application,” *Biofpr*, vol. 5, no. 6, pp. 683–707, 2011.
- [30] N. Kaliyan and R. V. Morey, “Natural binders and solid bridge type binding  
mechanisms in briquettes and pellets made from corn stover and switchgrass,”  
*Bioresour. Technol.*, vol. 101, no. 3, pp. 1082–1090, 2010.
- [31] A. N. Patankar and G. Mandal, “The packing of solid particles: A review,”  
*Trans. Indian Ceram. Soc.*, vol. 39, no. 4, pp. 109–119, 1980.
- [32] J. M. Castellano, M. Gómez, M. Fernández, L. S. Esteban, and J. E. Carrasco,  
“Study on the effects of raw materials composition and pelletization conditions  
on the quality and properties of pellets obtained from different woody and  
non woody biomasses,” *Fuel*, vol. 139, pp. 629–636, 2015.
- [33] W. Stelte, C. Clemons, J. K. Holm, J. Ahrenfeldt, U. B. Henriksen, and A. R.  
Sanadi, “Fuel Pellets from Wheat Straw: The Effect of Lignin Glass  
Transition and Surface Waxes on Pelletizing Properties,” *Bioenergy Res.*, vol.  
5, no. 2, pp. 450–458, 2012.
- [34] P. Gilbert, C. Ryu, V. Sharifi, and J. Swithenbank, “Effect of process  
parameters on pelletisation of herbaceous crops,” *Fuel*, vol. 88, no. 8, pp.  
1491–1497, 2009.
- [35] W. Stelte, J. K. Holm, A. R. Sanadi, S. Barsberg, J. Ahrenfeldt, and U. B.  
Henriksen, “A study of bonding and failure mechanisms in fuel pellets from  
different biomass resources,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 35, no. 2, pp. 910–  
918, 2011.



- [36] N. . b Said, M. M. . Abdel Daiem, A. . García-Maraver, and M. . Zamorano, "Influence of densification parameters on quality properties of rice straw pellets," *Fuel Process. Technol.*, vol. 138, pp. 56–64, 2015.
- [37] S. Sokhansanj, S. Mani, X. Bi, P. Zaini, and L. Tabil, "Binderless pelletization of biomass," *ASAE Annu. Int. Meet. ...*, vol. 300, no. 5, pp. 1–13, 2005.
- [38] P. Lehtikangas, "Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark.," *Biomass and Bioenergy*, vol. 20, no. 5, pp. 351–360, 2001.
- [39] K. Ishii and T. Furuichi, "Influence of moisture content, particle size and forming temperature on productivity and quality of rice straw pellets," *Waste Manag.*, vol. 34, no. 12, pp. 2621–2626, 2014.
- [40] J. Jackson, A. Turner, T. Mark, and M. Montross, "Densification of biomass using a pilot scale flat ring roller pellet mill," *Fuel Process. Technol.*, vol. 148, pp. 43–49, 2016.
- [41] M. Puig-Arnavat, L. Shang, Z. Sárossy, J. Ahrenfeldt, and U. B. Henriksen, "From a single pellet press to a bench scale pellet mill — Pelletizing six different biomass feedstocks," *Fuel Process. Technol.*, vol. 142, pp. 27–33, 2016.
- [42] I. Yang, S. ho Kim, M. Sagong, and G. S. Han, "Fuel characteristics of agropellets fabricated with rice straw and husk," *Korean J. Chem. Eng.*, vol. 33, no. 3, pp. 851–857, 2016.
- [43] S. Xu, Y. Tao, W. Liao, and B. Yan, "Optimizing the formula for rice husk pellet fuel using orthogonal array testing," vol. 725, pp. 279–282, 2013.
- [44] B. Missagia, C. Guerrero, S. Narra, Y. Sun, P. Ay, and H. J. Krautz, "Physicomechanical Properties of Rice Husk Pellets for Energy Generation," *Energy & Fuels*, vol. 25, no. 12, pp. 5786–5790, 2011.

- [45] M. Bakari and M. Ngadi, “Effect of process parameters on densification of rice husk at medium pressures,” vol. 7004, 2013.
- [46] A. Yank, M. Ngadi, and R. Kok, “Physical properties of rice husk and bran briquettes under low pressure densification for rural applications,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 84, pp. 22–30, 2016.
- [47] N. Kaliyan and R. Vance Morey, “Factors affecting strength and durability of densified biomass products,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 33, no. 3, pp. 337–359, 2009.
- [48] S. Mani, L. G. Tabil, and S. Sokhansanj, “An overview of compaction of biomass grinds,” *Powder Handl. Process.*, vol. 15, no. 3, pp. 160–168, 2003.
- [49] N. Kaliyan and R. Vance Morey, “Factors affecting strength and durability of densified biomass products,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 33, no. 3, pp. 337–359, 2009.
- [50] M. T. Carone, A. Pantaleo, and A. Pellerano, “Influence of process parameters and biomass characteristics on the durability of pellets from the pruning residues of *Olea europaea* L,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 35, no. 1, pp. 402–410, 2011.
- [51] R. M. Davies and O. a Davies, “Effect of Briquetting Process Variables on Hygroscopic Property of Water Hyacinth Briquettes,” vol. 2013, pp. 5–10, 2013.
- [52] W. Stelte, J. K. Holm, A. R. Sanadi, S. Barsberg, J. Ahrenfeldt, and U. B. Henriksen, “Fuel pellets from biomass: The importance of the pelletizing pressure and its dependency on the processing conditions,” *Fuel*, vol. 90, no. 11, pp. 3285–3290, 2011.
- [53] S. Yaman, M. Şahan, H. Haykiri-Açma, K. Şeşen, and S. Küçükbayrak,

- “Production of fuel briquettes from olive refuse and paper mill waste,” *Fuel Process. Technol.*, vol. 68, no. 1, pp. 23–31, 2000.
- [54] J. S. Moritz, A. S. Parsons, N. P. Buchanan, W. B. Calvalcanti, K. R. Cramer, and R. S. Beyer, “Effect of gelatinizing dietary starch through feed processing on zero-to three-week broiler performance and metabolism,” *J. Appl. Poult. Res.*, vol. 14, no. 1, pp. 47–54, 2005.
- [55] J. L. Tabil and S. Sokhansanj, “Process Conditioning Affecting the Physical Quality of Alfalfa Pellets,” vol. 12, no. 3, pp. 345–350, 1996.
- [56] B. Hill and S. A. D. Fund, *A Study of Factors Affecting Pellet Durability and Pelleting Efficiency in the Production of Dehydrated Alfalfa Pellets*. Saskatchewan Agriculture Development Fund, 1988.
- [57] M. Thomas and A. F. B. van der Poel, “Physical quality of pelleted animal feed 1. Criteria for pellet quality,” *Anim. Feed Sci. Technol.*, vol. 61, no. 1, pp. 89–112, 1996.
- [58] R. Janssen, “Advancement of pellets-related European standards,” 2009.
- [59] S. Heidenreich, M. Müller, and P. U. Foscolo, *Advanced Biomass Gasification: New Concepts for Efficiency Increase and Product Flexibility*. 2016.
- [60] P. McKendry, “Energy production from biomass (part 3): Gasification technologies,” *Bioresour. Technol.*, vol. 83, no. 1, pp. 55–63, 2002.
- [61] D. L. Klass, *Biomass for renewable energy, fuels, and chemicals*. 1998.
- [62] A. Latif, “A Study of the Design of Fluidized Bed Reactors for Biomass Gasification,” 1999.
- [63] J. Grace and H. Bi, *Introduction to Circulating fluidized beds*. 2003.
- [64] O. Levenspiel, *Fluidization Engineering*. 1991.
- [65] W.-C. Yang, *Handbook of fluidization and fluid-particle systems*, vol. 1, no. 3.

2003.

- [66] D. Geldart, "Types of gas fluidization," *Powder Technol.*, vol. 7, no. 5, pp. 285–292, 1973.
- [67] B. Paudel and Z. G. Feng, "Prediction of minimum fluidization velocity for binary mixtures of biomass and inert particles," *Powder Technol.*, vol. 237, pp. 134–140, 2013.
- [68] S. Qiaoqun, L. Huilin, L. Wentie, H. Yurong, Y. Lidan, and D. Gidaspow, "Simulation and experiment of segregating/mixing of rice husk-sand mixture in a bubbling fluidized bed," *Fuel*, vol. 84, no. 14–15, pp. 1739–1748, 2005.
- [69] F. F. J. Chaouki, "Distribution of Large Biomass Particles in a sand-biomass Fluidized Bed: Experiments and Modelling," *AIChE J.*, vol. 60, no. 3, pp. 869–879, 2014.
- [70] K. V. N. S. Rao and G. V. Reddy, "Cold flow studies of rice husk, saw dust, and groundnut shell fuels in a fluidized bed," *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.*, vol. 32, no. 18, pp. 1701–1711, 2010.
- [71] H. Cui and J. R. Grace, "Fluidization of biomass particles: A review of experimental multiphase flow aspects," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 62, no. 1–2, pp. 45–55, 2007.
- [72] T. R. Rao and J. V. Ram. Bheemarasetti, "Minimum fluidization velocities of mixtures of biomass and sands," *Energy*, vol. 26, no. 6, pp. 633–644, 2001.
- [73] F. Fotovat, R. Ansart, M. Hemati, O. Simonin, and J. Chaouki, "Sand-assisted fluidization of large cylindrical and spherical biomass particles: Experiments and simulation," vol. 126, pp. 543–559, 2015.
- [74] Y. Zhao, S. Sun, H. Che, Y. Guo, and C. Gao, "Characteristics of cyclone gasification of rice husk," vol. 7, pp. 0–4, 2012.

- [75] S. J. Yoon, Y. Il Son, Y. K. Kim, and J. G. Lee, "Gasification and power generation characteristics of rice husk and rice husk pellet using a downdraft fixed-bed gasifier," *Renew. Energy*, vol. 42, pp. 163–167, 2012.
- [76] R. Khonde and A. Chaurasia, "Rice husk gasification in a two-stage fixed-bed gasifier: Production of hydrogen rich syngas and kinetics," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 21, pp. 8793–8802, 2016.
- [77] L. Lundberg, P. A. Tchoffor, D. Pallarès, R. Johansson, H. Thunman, and K. Davidsson, "Influence of surrounding conditions and fuel size on the gasification rate of biomass char in a fluidized bed," vol. 144, pp. 323–333, 2016.
- [78] R. Alipour, S. Yusup, Y. Uemura, B. Lai, F. Chin, H. Loong, and A. Al, "Syngas production from palm kernel shell and polyethylene waste blend in fluidized bed catalytic steam co-gasification process," *Energy*, pp. 1–5, 2014.
- [79] X. Xiao, X. Meng, D. D. Le, and T. Takarada, "Two-stage steam gasification of waste biomass in fluidized bed at low temperature: Parametric investigations and performance optimization," *Bioresour. Technol.*, vol. 102, no. 2, pp. 1975–1981, 2011.
- [80] T. Robinson, B. Bronson, P. Gogolek, and P. Mehrani, "Comparison of the air-blown bubbling fluidized bed gasification of wood and wood-PET pellets," *Fuel*, vol. 178, pp. 263–271, 2016.
- [81] C. A. G. G. CARLOS FRANCISCO VALDES RENTERIA, GLORIA PATRICIA MARRUGO ESCOBAR, FARID CHEJNE JANNA, JORGE IVÀN MONTOYA ARBELAEZ, "Pilot-Scale Fluidized-Bed Co-gasification of Palm Kernel Shell with Sub-bituminous Coal," *Energy And Fuels*, vol. 29, pp. 5894–5901, 2015.
- [82] J. F. V. J. FARID CHEJNE JANNA, CARLOS FRANCISCO VALDES

- RENTERIA, EDER JOSE EMERY GENES, CARLOS ARTURO LONDONO GIRALDO, “Co-gasification of Colombian coal and biomass in fluidized bed: An experimental study,” *Fuel*, vol. 88, pp. 424–430, 2009.
- [83] J. W. Kook, H. M. Choi, B. H. Kim, H. W. Ra, S. J. Yoon, T. Y. Mun, J. H. Kim, Y. K. Kim, J. G. Lee, and M. W. Seo, “Gasification and tar removal characteristics of rice husk in a bubbling fluidized bed reactor,” *Fuel*, 2016.
- [84] P. M. J.P.Makwanaa, A.K.Joshia, G. Athawaleb, Dharminder Singhb, “Air gasification of rice husk in bubbling fluidized bed reactor with bed heating by conventional charcoal,” *Bioresour. Technol.*, vol. 179, pp. 45–52, 2015.
- [85] M. Thakkar, J. P. Makwana, P. Mohanty, M. Shah, and V. Singh, “In bed catalytic tar reduction in the autothermal fluidized bed gasification of rice husk: Extraction of silica, energy and cost analysis,” *Ind. Crops Prod.*, vol. 87, pp. 324–332, 2016.
- [86] C. Loha, H. Chattopadhyay, and P. K. Chatterjee, “Thermodynamic analysis of hydrogen rich synthetic gas generation from fluidized bed gasification of rice husk,” *Energy*, vol. 36, no. 7, pp. 4063–4071, 2011.
- [87] H. H. V. Wilk a,\* , “Influence of fuel particle size on gasification in a dual fluidized bed steam gasifier,” *Fuel Process. Technol.*, vol. 115, pp. 139–151, 2013.
- [88] and I. H. Esa Kurkela, Minna Kurkela, “The Effects of Wood Particle Size and Different Process Variables on the Performance of Steam-Oxygen Blown Circulating Fluidized-Bed Gasifier,” *AIChE J.*, vol. 33, no. 2, pp. 482–489, 2014.
- [89] C. A. Alzate, F. Chejne, C. F. Valdés, A. Berrio, J. D. La Cruz, and C. A. Londoño, “CO-gasification of pelletized wood residues,” vol. 88, pp. 437–445,

2009.

- [90] a and P. M. Benjamin Bronson, a, b Fernando Preto, “Effect of Pretreatment on the Physical Properties of Biomass and Its Relation to Fluidized Bed Gasification,” *AIChE J.*, vol. 31, no. 3, 2012.
- [91] B. Bronson, P. Gogolek, P. Mehrani, and F. Preto, “Experimental investigation of the effect of physical pre-treatment on air-blown fluidized bed biomass gasification,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 88, pp. 77–88, 2016.
- [92] J. A. Posada-Duque and C. A. Cardona-Alzate, “Análisis de la refinación de glicerina obtenida como coproducto en la producción de biodiesel,” *Ing. y Univ.*, vol. 14, no. 1, pp. 9–28, 2010.
- [93] P. Bartocci, G. Bidini, F. Asdrubali, C. Beatrice, F. Frusteri, and F. Fantozzi, “Batch pyrolysis of pellet made of biomass and crude glycerol: Mass and energy balances,” *Renew. Energy*, vol. 124, pp. 172–179, 2018.
- [94] S. Emami, L. G. Tabil, and P. Adapa, “Effect of glycerol on densification of agricultural biomass,” *Int. J. Agric. Biol. Eng.*, vol. 8, no. 1, pp. 64–73, 2015.
- [95] K. Odeen and J. Noren, “Durability of wood pellets,” *Durab. Build. Mater. Components 8, Vols 1-4, Proc.*, no. April, p. 780–786, 1999.
- [96] A. J. Zapata Saad, “Investigación del efecto de los parámetros de elaboración de pellets de huesco de palma en el proceso de pirólisis,” Universidad Nacional de Colombia, 2016.
- [97] R. García, M. P. González-Vázquez, C. Pevida, and F. Rubiera, “Pelletization properties of raw and torrefied pine sawdust: Effect of co-pelletization, temperature, moisture content and glycerol addition,” *Fuel*, vol. 215, no. November 2017, pp. 290–297, 2018.
- [98] D. Lu, L. G. Tabil, D. Wang, G. Wang, and S. Emami, “Experimental trials

- to make wheat straw pellets with wood residue and binders,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 69, no. 17, pp. 287–296, 2014.
- [99] M. Soleimani, X. L. Tabil, R. Grewal, and L. G. Tabil, “Carbohydrates as binders in biomass densification for biochemical and thermochemical processes,” *Fuel*, vol. 193, pp. 134–141, 2017.
- [100] D. H. Lu, L. G. Tabil, D. C. Wang, G. H. Wang, and Z. Q. Wang, “Optimization of binder addition and compression load for pelletization of wheat straw using response surface methodology,” *Int. J. Agric. Biol. Eng.*, vol. 7, no. 6, pp. 67–78, 2014.
- [101] H. Rezaei, S. Sokhansanj, and C. J. Lim, “Minimum fluidization velocity of ground chip and ground pellet particles of woody biomass,” *Chem. Eng. Process. Process Intensif.*, vol. 124, no. October, pp. 222–234, 2018.
- [102] H. Rezaei, F. Yazdanpanah, C. J. Lim, A. Lau, and S. Sokhansanj, “Pyrolysis of ground pine chip and ground pellet particles,” *Can. J. Chem. Eng.*, vol. 94, no. 10, pp. 1863–1871, 2016.
- [103] C. Erlich, E. Björnbom, D. Bolado, M. Giner, and T. H. Fransson, “Pyrolysis and gasification of pellets from sugar cane bagasse and wood,” *Fuel*, vol. 85, no. 10–11, pp. 1535–1540, 2006.
- [104] P. Ammendola, R. Chirone, F. Miccio, G. Ruoppolo, and F. Scala, “Devolatilization and attrition behavior of fuel pellets during fluidized-bed gasification,” *Energy and Fuels*, vol. 25, no. 3, pp. 1260–1266, 2011.



**Tabla A-2:** Estado del arte de peletización

Autor(es)	Año	Biomasa	Tipo de peletizadora	Composición lignocelulósica			Valores de los parámetros		Valores de las propiedades		Referencia
				Lignina	Hemicelulosa	Celulosa	Humedad de biomasa [%p/p]	Tamaño de partícula [mm]	Densidad de bulto [kg/m³]	Durabilidad [%]	
Castellano et al	2015	Residuos de pino	Matriz plana	28,46	44,16	23,56	10	2	-	95,8	[32]
							12	4	-	87,3	
		Residuos de Eucalipto		30,31	34,33	19,15	10	2	-	99,1	
							12	4	-	99,1	
		Residuos de roble		24,44	36,44	21,94	10	2	-	97,2	
							12	4	-	97,7	
		Tallo de árbol de vino		24,87	32,38	19,66	10	2	-	98,6	
							12	4	-	99,5	
		Polar 1		25,19	42,65	20,33	10	2	-	92	
							12	4	-	84,1	
		Polar 2		27,48	37,62	20,81	10	2	-	95,3	
							12	4	-	76,1	
		Residuos de avena		10,59	26,86	24,53	10	2	-	85	
							12	4	-	85,6	
		Triticale		11,07	34,75	20,86	10	2	-	90,2	
							12	4	-	84,5	
		Paja de arroz		13,82	37,09	24,08	10	2	-	50,78	
							12	4	-	NP	
Stelte et al	2012	Paja de trigo	Una sola unidad	-	-	-	8	1,9	902	-	[33]
Said et al	2015	Paja de arroz	Matriz plana	-	-	-	12	<4	NP	NP	[36]
							15		660	90,7	
							17		670	91,4	
Lehtikangas	2001	Aserrín: 60% picea - 40% pino	Matriz rotatoria	29,7	-	-	8	1 - 2 mm	606	99,2	[38]

		Corteza: 60% picea - 40% pino		48,3	-	-			747	99,7	
Ishii and Foruichi	2014	Paja de trigo	Matriz plana	-	-	-	15	5	-	84,6	[39]
								10	-	87,1	
								20	-	87,9	
Jackson et al	2016	Miscanthu s	Matriz plana	-	-	-	10	< 3	NP	NP	[40]
							15		411,4	55,8	
							20		454,4	73,3	
							25		564,9	89,9	
		Pasto Varilla					10		NP	NP	
							15		NP	NP	
							20		424,7	79,8	
							25		549,6	93,1	
		Paja de trigo					10		NP	NP	
							15		NP	NP	
							20		380,7	65,1	
							25		482,0	93,1	
							15		552,6	91,7	
							20		638,6	95,9	
							25		635,5	92,7	
Rastrojo de maíz											
Yang et al	2015	Cascarilla de arroz	Matriz vertical	28,62	-	-	11	1,41<>3,17	-	83,3	[42]
		Paja de arroz		12,83					-	98,5	
Missagia et al	2011	Cascarilla de arroz	Matriz vertical	-	-	-	17	2	-	96,0	[44]
							20		-	86,5	
							17	4	-	95,1	
							20		-	85,7	
							17	6	-	95,4	
							20		-	84,6	
GLICERINA											
Emami et al	2015	Cebada	Una sola unidad	-	-	-	0	1,6	-	76	[94]
							2,5		-	88	

							5		-	87			
							7,5		-	88			
							0	3,2	-	89			
							2,5		-	88			
							5		-	94			
							7,5		-	92			
							0	6,4	-	97			
							2,5		-	98			
							5		-	98			
							7,5		-	99			
		Canola							0	1,6		-	52
									2,5			-	49
									5			-	51
									7,5			-	62
									0	3,2		-	80
									2,5			-	80
									5			-	88
									7,5			-	74
									0	6,4		-	99
									2,5			-	100
	5	-		100									
	7,5	-		99									
	Avena							0	1,6	-		70	
								2,5		-		68	
								5		-		67	
								7,5		-		72	
								0	3,2	-		89	
								2,5		-		89	
								5		-		97	
								7,5		-		94	
								0	6,4	-		100	
								2,5		-		100	

							5		-	100		
		7,5		-			98					
		Trigo						0	1,6	-		86
								2,5		-		73
								5		-		75
								7,5		-		84
								0	3,2	-		86
								2,5		-		86
								5		-		69
								7,5		-		90
								0	6,4	-		99
								2,5		-		99
								5		-		99
								7,5		-		99